



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

도시계획학 석사학위논문

**2010 년대 지역간 철도 네트워크의
공간적 형평성 변화**

**Changes in spatial equity of the Korean intercity rail
network in the 2010s**

2023 년 02 월

서울대학교 환경대학원

환경계획학과 교통학전공

김 선 화

2010년대 지역간 철도 네트워크의 공간적 형평성 변화

지도 교수 장 수 은

이 논문을 도시계획학 석사학위논문으로 제출함
2022년 12월

서울대학교 환경대학원
환경계획학과 교통학전공
김 선 화

김선화의 석사 학위논문을 인준함
2023년 02월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

교통 서비스는 지역의 접근성을 향상시키며, 사람들의 경제활동 및 삶의 질에 직간접적으로 영향을 미친다. 특히 정시성, 친환경성 등의 특성을 지니는 철도는 지속가능한 교통체계 및 지역균형발전을 위한 정책의 일환으로 주목받고 있다. 그러나 우리나라는 오랜 기간동안 대도시와 경부축을 중심으로 효율성 위주의 철도망이 공급되어왔다. 하지만 최근 들어 「제4차 국가철도망 구축계획」 등에서 알 수 있듯이, 철도망 구축의 목표가 균형적 공급을 고려하는 방향으로 변화하고 있다. 향후 지역 형평성 기반의 철도 서비스 구축을 위해서는 현재 철도 네트워크의 공급 수준을 분석할 필요가 있다. 고속철도 개통 전후의 도시 경제 변화 등을 다룬 연구들은 많으나, 최근 10년간 철도네트워크 구조 변화에 대한 형평성 변화를 다룬 연구는 부족하다. 또한 기존 연구들은 주로 토지이용이나 인구와 같은 사회경제적 요인을 바탕으로 형평성을 평가하고 있다. 철도 네트워크의 구조와 사람들의 이동 패턴 사이에는 상호작용이 존재하기 때문에 지역 불균형의 근본적 원인인 교통체계의 특성에 초점을 맞출 필요가 있다.

이에 본 연구는 네트워크 분석법을 활용하여 지역 간 철도의 공급 수준 및 수요를 평가하고 이것이 공간적으로 어떻게 불균형적으로 분포하고 있는지 분석하였다. 교통체계의 특성을 반영하기 위해 네트워크 분석 방법론 중 하나인 노드 중심성 분석을 활용하였다. 중심성 지표는 연결강도 중심성, 매개 중심성, 근접 중심성을 활용하였으며, 세 지표는 각각 연결성(connectivity), 매개성(transferability), 그리고 이동성(mobility)을 나타낸다. 도출된 지역별 중심성 값을 바탕으로 공간적 형평성의 변화를 분석하였다. 형평성 분석은 비공간 통계량과 공간 통계량 모두를 활용하였다. 지니계수를 통해 10년간의 전반적인 우리나라 철도 서비스 불균형 추이를 파악하고, 공간적 자기상관(spatial autocorrelation)을 바탕으로 공간적 분포를 살펴보았다. 공간 자기상관 분석법은 Anselin의 Local Moran's I 지수를 활용하였으며, 공급수준과 수요 각각의 공간 집중정도 뿐 아니라 이변량 모란지수를 통해 공급과 수요의 상관관계 또한 측정했다.

본 연구의 주요 결과를 정리하면 다음과 같다. 첫째, 지니계수 분석

결과, 2011년과 2020년의 연결강도 중심성과 매개 중심성은 0.8 전후, 근접 중심성은 0.6 정도의 값으로 도출되었다. 지니계수가 0과 1사이 값을 가지는 것으로 미루어 보았을 때 우리나라의 지역 간 철도 공급 수준과 수요는 다소 불균형적임을 알 수 있다. 최근 10년동안 다축으로 철도망이 확장되었음에도 불구하고 공간적 형평성은 개선되지 않은 것이다. 물리적인 철도 노선 공급만으로는 공간적 형평성이 쉽게 개선되지 않는다는 것을 확인할 수 있는 대목이다. 둘째, 국지적 모란지수를 분석한 결과, 2011년과 2020년 모두 경북권과 충청권의 철도 서비스 수준이 여전히 다른 지역에 비해 매우 높은 것으로 나타났다. 특히 환승 허브를 식별하는 매개중심성을 분석한 결과, 최근 10년동안 충청권의 영향력이 더욱 증가하였음을 알 수 있다. 환승 허브는 네트워크 내에서 통제력이 강한 노드를 의미한다. 따라서 특정 노드의 매개성이 강해지면 해당 지역에 위험이 발생했을 때 전체 네트워크에 문제가 발생할 수 있다. 반면, 경기북부, 전라남도 및 일부 강원권의 철도 서비스 수준과 수요가 낮은 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 향후 지역균형발전을 위한 철도 투자 방향을 설정할 때 활용될 수 있다. 특히 수요에 비해 공급 수준이 낮은 지역을 우선 투자되어야 하는 지역으로 선별할 수 있다. 다만, 광역철도와 도시철도를 분석 범위에서 제외하였기 때문에 수도권 영향력이 과소평가되었을 수 있다. 또한 지역 내의 토지특성 등이 다르므로 실제 지역균형발전을 위해서는 보완적 타수단을 함께 고려하여야 한다.

주요어 : 네트워크 이론, 공간적 형평성, 노드 중심성, 지니 계수, 공간적 자기상관, 모란지수

학 번 : 2021-29161

목 차

제 1 장 서론	1
제 1 절 연구의 배경 및 목적	1
제 2 절 연구의 범위 및 방법	2
1. 시공간적 범위	2
2. 철도 분석 범위	2
3. 연구의 방법	6
제 2 장 이론 및 기존 연구 고찰	7
제 1 절 철도 네트워크의 형평성	7
1. 사회적 형평성	7
2. 공간적 형평성	8
제 2 절 철도 네트워크의 중심성	10
1. 네트워크 이론	10
2. 노드 중심성	11
제 3 절 기존 연구 시사점 및 본 연구의 차별성	13
제 3 장 자료 및 연구방법론	14
제 1 절 자료	14
1. 노드	18
2. 링크	22
제 2 절 연구방법론	18
1. 노드 중심성	18
2. 지니계수	22
3. LISA 분석	23
제 4 장 분석결과	26
제 1 절 철도 노드 중심성	26
1. 지역별 중심성 분석 결과	26
2. 공급중심성과 수요중심성의 상관관계	39
제 2 절 철도 공간적 형평성 변화	39
1. 비공간 통계량	40

2. 공간 통계량	41
제 3 절 소결	52
제 5 장 결론.....	53
참고문헌.....	55
부록.....	60
Abstract	63

표 목차

[표 1-1] 2011~2020년 지역 간 철도 노선 변화.....	5
[표 2-1] 선행연구별 접근성 정의	8
[표 2-2] 철도 네트워크의 형평성 선행연구.....	9
[표 2-3] 철도 네트워크의 중심성 선행연구.....	12
[표 3-1] 노드 중심성 분석에 포함되는 노드 정보	14
[표 3-2] 기존 연구의 링크 가중치	16
[표 3-3] 거리(distance) 산출 예시.....	19
[표 3-4] 중심성 지표 정리	21
[표 4-1] 2011년 연결강도 중심성 순위.....	28
[표 4-2] 2020년 연결강도 중심성 순위.....	30
[표 4-3] 2011년 매개 중심성 순위.....	32
[표 4-4] 2020년 매개 중심성 순위.....	34
[표 4-5] 2011년 근접 중심성 순위.....	36
[표 4-6] 2020년 근접 중심성 순위.....	38
[표 4-7] 연도별 지표별 공급/수요중심성 상관관계	39
[표 4-8] 지표별 연도별 지니계수	41

그림 목차

[그림 1-1] 지역 간 철도 노선도.....	3
[그림 1-2] 연구 흐름도.....	6
[그림 2-1] Network Representation.....	10
[그림 3-1] 가중네트워크 예시.....	19
[그림 3-2] 로렌츠곡선.....	22
[그림 3-3] 공간적 자기상관.....	23
[그림 3-4] LISA 분석 결과 예시.....	24
[그림 4-1] 2011년 연결강도 중심성 사분면 분석 결과 ..	27
[그림 4-2] 2020년 연결강도 중심성 사분면 분석 결과 ..	29
[그림 4-3] 2011년 매개 중심성 사분면 분석 결과	31
[그림 4-4] 2020년 매개 중심성 사분면 분석 결과	33
[그림 4-5] 2011년 근접 중심성 사분면 분석 결과	35
[그림 4-6] 2020년 근접 중심성 사분면 분석 결과	37
[그림 4-7] 연결강도 중심성 로렌츠곡선.....	40
[그림 4-8] 매개 중심성 로렌츠곡선.....	40
[그림 4-9] 근접 중심성 로렌츠곡선.....	40
[그림 4-10] 연결강도 중심성 일변량 LISA 분석의 클러스터 지도	42
[그림 4-11] 매개 중심성 일변량 LISA 분석의 클러스터 지도	44
[그림 4-12] 근접 중심성 일변량 LISA 분석의 클러스터 지도	46
[그림 4-13] 일변량 LISA 분석의 유의성 지도.....	47
[그림 4-14] 연결강도 중심성 이변량 LISA 분석의 클러스터 지도	48
[그림 4-15] 매개 중심성 이변량 LISA 분석의 클러스터 지도	49
[그림 4-16] 근접 중심성 이변량 LISA 분석의	

클러스터 지도	50
[그림 4-17] 이변량 LISA 분석의 유의성 지도.....	51

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경 및 목적

철도는 단기적으로 통행시간 단축을 통한 개인의 이동성 및 접근성을 개선하며, 장기적으로는 지역의 소득, 경제활동 및 인접 도시와의 연계성과 같은 도시 네트워크 구조 변화에 영향을 준다(Zhang et al., 2020; Jiao et al., 2017). 철도망의 공급 수준이 높은 지역은 접근성이 개선되고 점차 인구 및 소득 수준이 높아진다. 반대로 교통 인프라에서 소외되는 지역은 활동 기회가 줄어들게 된다. 시장 발전과 지역의 경제 성장을 위해서는 철도의 역할이 중요하다(Démurger, 2001).

형평성은 소득수준, 연령 등 다양한 기준으로 평가된다. 공간적 형평성이란 특정 재화나 서비스가 지역 사이에 균등하게 분배되는 것을 의미한다(Viegas, 2001; Levionson, 2009). 공간적 형평성은 개인의 수준 또는 능력과 관계없이 모든 이용자에게 동등한 서비스가 제공되어야 한다는 관점의 수평적 형평성과 일맥상통한다(Park and Chang, 2020).

한편, 우리나라는 오랜 기간 동안 대도시 위주로 철도망이 공급되어 왔다(Kim and Sultana, 2014). 철도 시설의 투자 및 공급이 대도시 중심으로 몰리면서 철도 서비스의 지역 불균형을 초래했다(김수현 외, 2020). 그러나 최근 지속 가능한 교통체계 및 국토균형발전을 위한 정책의 일환으로 지역 형평성 기반의 철도망 구축이 강조되고 있다. 예컨대 2004년 경부고속철도 개통 이후 2010년까지는 경부축을 중심으로 철도망이 공급되었으나, 2010년대에 들어서는 전라선, 강릉선 등 다양한 노선의 고속철도망이 공급되기 시작했다. 경부축에만 집중되어있던 철도 네트워크의 구조가 다축의 형태로 변화함에 따라 지역 간 철도 공급 수준의 불균형이 감소하였는지 확인할 필요가 있다. 이에 본 연구는 최근 10년간 지역 간 철도 네트워크의 공간적 형평성이 어떻게 변화하였는지 살펴보고자 한다.

고속철도 개통으로 인한 지역별 사회적 형평성은 많은 연구들을 통해 논의되었지만, 최근 10년간 철도 네트워크의 변화를 공간적 형평성 차원에서 다룬 연구들은 찾아보기 힘들다. 본 연구는 철도 공급으로

인한 사회경제적 변화의 근본적 요인인 교통체계의 특성에 초점을 맞춘다(정동재 외, 2020). 이는 간접적 영향 요인인 소득과 같은 사회경제 지표를 활용한 기존 연구들과 차별성을 가진다. 철도 네트워크의 특성을 나타내는 지표로는 네트워크 분석 기법 중 하나인 노드 중심성을 활용하고, 공급 및 수요 가중치를 각각 설정하여 공급 수준뿐만 아니라 실제 여객 수요에 따른 지역의 중심성을 측정한다. 지니계수를 활용하여 10년 간의 공간적 불균형 변화 추이를 살펴보고, 국지적 모란 지수를 통해 형평성의 공간적 분포를 분석한다.

제 2 절 연구의 범위 및 방법

1. 시공간적 범위

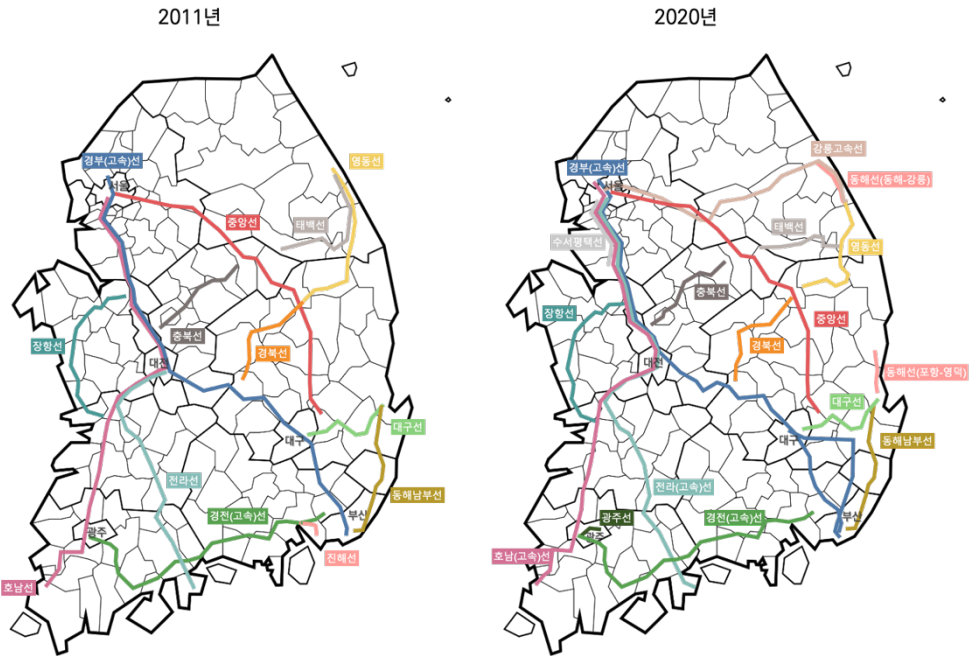
지역간 철도 서비스의 공간적 형평성 변화를 분석하기 위한 시간적 범위는 2011년과 2020년이다. 2011년은 우리나라 철도 체계에서 큰 변화가 있었던 시기 중 하나로 경부선 KTX 2단계 개통, 즉 경부고속선이 완성된 직후이다. 공간적 범위는 전국을 대상으로 하되, 철도가 지나지 않는 제주도와 경상북도 울릉군은 분석에서 제외한다. 행정구역은 통계청 통계분류포털의 한국행정분류 현황(2020.4.1)을 기준으로 삼는다.

2. 철도 분석 범위

철도는 운행 거리 등 기준에 따라 다양한 분류 체계로 구분될 수 있다. 일반적으로 지역간 철도와 광역/도시 철도로 분류되며, 지역간 철도에는 고속철도와 일반철도가 포함된다. 본 연구는 고속철도를 포함하는 지역 간 철도를 분석 대상으로 한정한다.

본 연구는 사람들이 지역 간을 이동하는 여객 서비스에 초점을

맞춘다. 따라서 철도통계연보를 기준으로 여객 영업거리①가 존재하고 신호소 ②, 신호장 ③을 제외한 정차역이 존재하는 노선만을 분석 대상으로 포함한다. 각 연도에 포함되는 철도 노선은 운영 노선을 기준으로 국토교통부 철도통계연보 및 코레일 ④, SR ⑤ 운행시간표를 통해 수집한다.



[그림 1-1] 지역 간 철도 노선도

[그림 1-1]은 2011년과 2020년의 지역 간 철도 노선도이다. 2011년에는 15개 노선의 지역 간 철도가 운영되었으며, 2020년 기준으로는 21개의 노선이 운영되고 있다. 진해선은 2012년 운행

- ① 영업거리란 수송량과 운임계산의 기초가 되는 철도선로의 길이로 실제영업이 이루어지는 구간거리를 의미한다. 선로연장이 영업용으로 사용하지 않는 노선까지 포함한 총 철도 노선의 거리를 의미하는 것과 차이가 있다(국토교통부, 2020)
- ② 신호소란 여객 취급을 하지 않고 오직 신호기의 취급을 하기 위한 장소이다.
- ③ 신호장이란 열차의 교행 또는 대피를 위하여 설치한 장소이다.
- ④ 코레일, <https://www.letskorail.com/ebizcom/cs/guide/guide/guide11.do>
- ⑤ SR, <https://etk.srail.kr/cms/archive.do?pageId=TK0402050000>

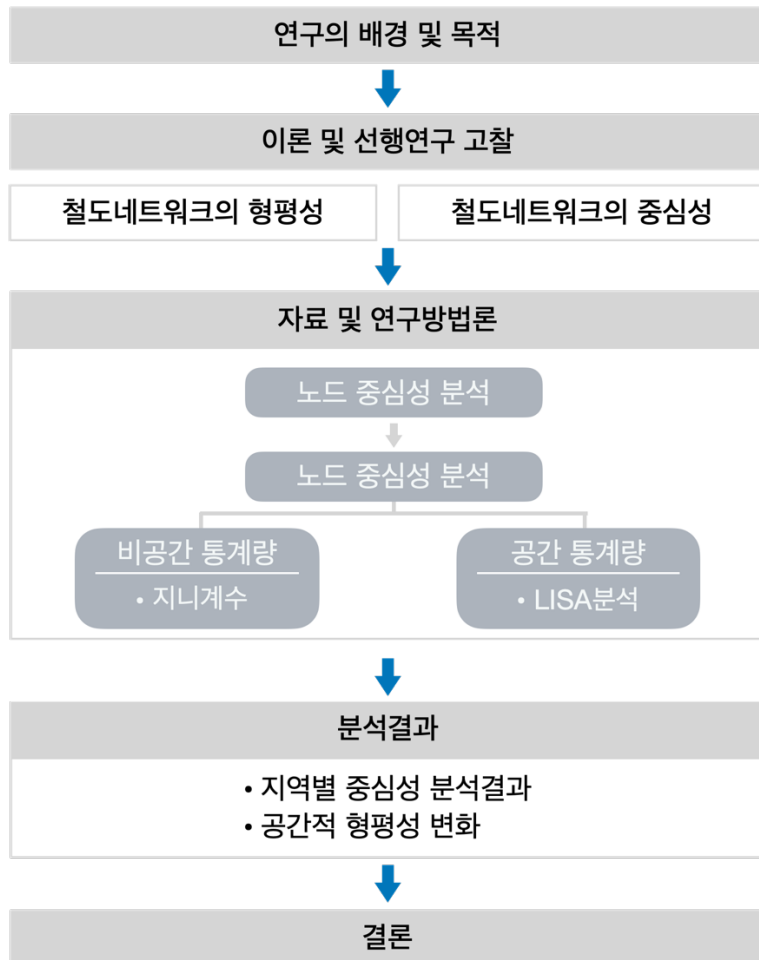
중단으로 폐지되었다. 2011년과 2020년 사이에는 동해선, 강릉선 등 여러 신규 노선이 개통하였으며, 고속선이 추가 운영되는 등 여러 변화가 있었다. 호남선의 경우 2004년 KTX가 개통하였음에도 불구하고, 고속선이 아니었기 때문에 실제로는 고속철도로서의 서비스를 제공하지 못하였다. 실제 호남고속선 개통은 2015년이므로 해당 시점을 개통일로 판단한다(Kim and Sultana, 2014).

[표 1-1] 2011~2020년 지역 간 철도 노선 변화

구분	2011년	2020년
고속선	-	· 강릉선(행신~동해)
	· 경부선(행신~부산)	· 경부선(행신/수서~부산)
	· 경전선(서울~마산)	· 경전선(행신~마산)
	-	· 경부선(행신~포항)
	-	· 수서평택선(수서~평택)
	-	· 전라선(행신~여수엑스포)
	-	· 호남선(행신~목포)
일반선	· 경부선(서울~부산)	· 경부선(서울~부산)
	· 경북선(김천~영주)	· 경북선(김천~영주)
	· 경전선 (광주송정~삼랑진)	· 경전선 (광주송정~삼랑진)
	· 광주선(광주~광주송정)	· 광주선(광주~광주송정)
	· 대구선(동대구~포항)	· 대구선(동대구~포항)
	-	· 동해선(포항~영덕)
	· 동해남부선 (동대구~부진)	· 동해남부선 (동대구~부진)
	· 영동선(강릉~영주)	· 영동선(동해~영주)
	· 장항선(용산~서대전)	· 장항선(용산~익산)
	· 전라선(용산~여수)	· 전라선 (용산~여수엑스포)
	· 중앙선(청량리~경주)	· 중앙선(청량리~경주)
	· 진해선(대구~진해)	· (폐지)
	· 충북선(대전~제천)	· 충북선(대전~제천)
	· 태백선(제천~강릉)	· 태백선(제천~동해)
	· 호남선(용산~목포)	· 호남선(용산~목포)

3. 연구의 방법

본 연구는 2010년대 지역 간 철도 네트워크 변화에 따른 지역별 중심성을 분석하고, 이를 바탕으로 수평적 형평성 차원에서의 지역 간 철도 서비스 격차가 어떻게 달라졌는지를 평가한다. 다음 장에서는 철도망의 형평성과 노드 중심성을 다룬 연구들을 고찰하고 본 연구의 차별성을 제시한다. 이어서 분석을 위해 필요한 자료를 설명하고 연구방법론을 제안한다. 이후 제 4 장에서는 2011년과 2020년의 지역 간 철도망을 대상으로 노드 중심성을 분석하고 해당 결과를 바탕으로 철도 서비스의 지역 형평성을 분석한다. 마지막 장에서는 분석 결과를 요약하고, 향후 연구 과제를 설정한다.



[그림 1-2] 연구 흐름도

제 2 장 이론 및 기존 연구 고찰

이 장에서는 네트워크 이론을 정의하고, 및 철도 네트워크의 형평성과 중심성을 다룬 기존 연구들을 고찰한다. 이를 바탕으로 기존 연구의 한계점과 본 연구의 필요성을 제시한다

제 1 절 철도 네트워크의 형평성

철도 네트워크와 형평성을 다루는 기존 연구들은 크게 두 분류로 구분된다. 학계에 널리 알려져 있는 롤스(J. Rawls)의 개념에 기반하는 ‘사회적 형평성(social equity)’과 본 연구에서 다루고자 하는 ‘공간적 형평성(spatial equity)’이다.

1. 사회적 형평성

철도 서비스의 사회적 형평성을 분석한 연구들은 주로 소득 또는 계층을 고려하는 수직적 형평성에 초점을 맞추고 있다. 형평성 평가지표로는 요금, 통행시간 등을 활용하고 있다.

Ren et al. (2020)은 설문조사를 통해 사회적 계층 별로 고속철도 발전에 따른 수단선택의 변화를 분석하여 고속철도가 사회적 배제^⑥에 영향을 미치는가에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과, 다른 계층에 비해 학생이나 고령자와 같이 소득이 낮은 계층이 고속철도가 개통했음에도 불구하고 기존 일반철도를 이용하는 확률이 높았다. Dobruszkes et al. (2022)은 소득, 직업, 교육 정도, 성별, 연령 등 사회적 불평등의 주요 지표들에 따라 고속철도 서비스 이용에 격차가 발생하는지 분석하였으며, 소득의 영향이 큰 것으로 나타났다. Song et al. (2018)은 광주광역시 도시철도의 확장에 따라 계층, 성별 등의 사회적 형평성이 어떻게 변화하였는지 분석하였다. 이준호(2019)는 서울시 버스 및 도시철도를

^⑥ 사회적 배제란 종래의 물질적 빈곤을 포함한 다양한 요인이 복합적으로 작용한 결과 특정 계층이 사회의 주류로부터 격리되는 배제론적 개념을 의미한다(윤영원·장수은, 2014).

대상으로 일반인과 취약계층 간 형평성을 평가하였으며, 운행빈도, 통행시간 및 신뢰성을 형평성 평가지표로 활용하였다.

2. 공간적 형평성

철도망의 공간적 형평성을 다룬 기존 연구들은 대부분 철도 서비스 공급으로 인한 접근성 변화에 초점을 맞추고 있다. 접근성은 연구자에 따라 다양하게 정의된다([표 2-1] 참조).

[표 2-1] 선행연구별 접근성 정의

연구	정의	평가지표
송예나 외(2019) Harris (2001)	· 행위자가 원하는 곳까지 이동할 수 있는 능력과 이의 수월성 (convenience)	· 통행시간
Kim and Sultana (2014)	· 경제활동의 기회	· 통행시간 · 인구
정동재 외(2020)	· 교통 서비스수준과 활동기회의 공간적 분포가 동시에 결합된 개념	· 활동기회의 수 · 통행시간
Levinson and King (2020)	· 사람이 재화, 서비스, 활동 (“기회”)에 접근하는 능력	· 통행시간 · 활동기회의 수 등
Litman (2003)		· 기회에 도달하기 위한 일반화비용

Zhang et al. (2020)은 GRP, 인구, 경제활동기회로의 접근성 등의 지표로 지니계수를 활용하여 고속철도 발전에 따른 중국 내 지역 간 불균형의 변화를 분석하였다. Chen and Haynes (2017)은 변동계수, 타일 지수, 지니계수의 세 가지 방법론을 통해 고속철도 발전에 따른 지역 격차를 분석하였다. 철도 네트워크의 변화를 정량적으로 나타내기 위해 접근성 지표를 활용하였으며, 지표의 변수로 소득과 인구를 적용하였다. Kim and Sultana (2015)는 한국 고속철도의 접근성 변화에 따른 지역 간 형평성 변화를 분석하였으며, Liu et al. (2017)은 노드 중심성과

지니계수를 활용하여 동남아시아에서의 공간적 불평등을 분석하였다. 송예나 외(2019)는 역간 통행시간을 바탕으로 산출한 접근성 지표를 활용하여 서울시 지하철 접근성에 따른 공간적 불평등 지수를 산출하였다.

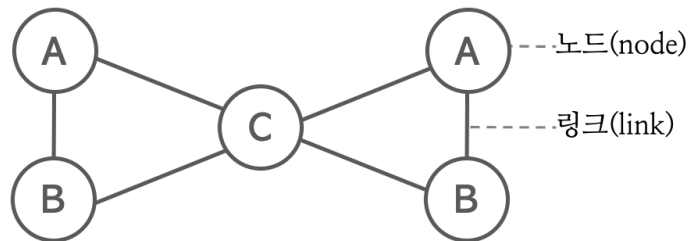
[표 2-2] 철도 네트워크의 형평성 선행연구

연구	연구주제	방법론	형평성 평가지표
사회적 형평성			
Ren et al. (2020)	· 고속철도가 사회적 배제에 미치는 영향 및 요인	· 설문조사 · 다항 로짓 분석	· 요금 · 통행 습관 · 통행거리
Dobruszkes et al. (2022)	· 고속철도 이용 격차에 영향을 미치는 요인	· 메타분석	· 요금 · 통행시간 등
이준호 (2019)	· 버스 및 도시철도 서비스의 일반인과 취약계층 간 형평성	· 지니계수 · 시나리오 분석	· 운행빈도 · 통행시간 · 신뢰성
Song et al. (2018)	· 도시철도 확장에 따른 형평성 변화	· 지니계수	· Publit Transit Index (PTI)
공간적 형평성			
Zhang et al. (2020)	· 고속철도 발전에 따른 중국 내 지역 형평성 변화	· 지니계수	· 운행빈도 · 접근성
Chen and Haynes (2017)	· 고속철도 발전이 지역 간 경제 불균형에 미치는 영향	· 변동계수 · 타일 지수 · 지니계수	· 접근성
Kim and Sultana (2015)	· 한국 고속철도의 접근성 변화에 따른 지역 간 형평성 변화	· 변동계수	· 접근성
Liu et al. (2017)	· 동남아시아 국가 간 지역 내 교통망에 대한 공간적 불균형	· 노드 중심성 · 지니계수	· 운행빈도 · 용량 · 노선수
송예나 외 (2019)	· 서울 지하철 네트워크의 공간적 형평성	· 지니계수	· 접근성

제 2 절 철도 네트워크의 중심성

본 연구는 지역간 철도 네트워크를 대상으로 노드 중심성 분석을 수행한다. 따라서 노드 중심성 분석의 바탕이 되는 네트워크 이론을 정의한 후, 철도 네트워크에서 노드 중심성을 분석한 기존 연구를 고찰한다.

1. 네트워크 이론



[그림 2-1] Network representation

$$G = (V, E)$$

$$V = A, B, C, D, E \quad (2-1)$$

$$E = e_{ab}, e_{ac}, e_{bc}, e_{cd}, e_{ce}, e_{de}$$

네트워크(G)는 개체를 나타내는 노드(V)와 인접 노드 간을 관계를 설명하는 링크(E)로 표현된다. 교통 분야에서는 철도, 도로 등 다양한 운송 시스템 또는 여객과 화물의 이동을 네트워크로 표현할 수 있다. 이미 많은 선행 연구에서 다양한 네트워크 분석 기법을 통해 네트워크의 강건성, 중심성, 회복탄력성 등을 평가하고 있다(김경태·송재민, 2017; Casali and Heinemann, 2019; Jansuwan et al., 2021; Brandes, 2005). 본 연구는 네트워크 분석에서 가장 많이 활용되는 방법론 중 하나이자 노드 간의 관계를 통해 개별 노드의 중요도를 파악하는 기법인 중심성을 활용하고자 한다. 네트워크 분석은 네트워크 고유의 구조 관점에서 평가하는 것이고, 더불어 평가하고 싶은 대상에 따라 가중치를 선택하여 분석할 수 있는 장점이 있다.

2. 노드 중심성

노드 중심성(Node Centrality)은 네트워크 내에서 영향력이 높고 중점적인 역할을 수행하고 있는 지역을 판별하는 분석 방법론이다. 철도의 노드 중심성을 분석한 기존 연구들의 특징은 크게 두 가지로 구분된다. 첫째, 연구들은 주로 네트워크의 특성을 파악하고 중요도가 큰 노드를 식별하기 위해 노드 중심성을 활용하였다. Cao et al. (2019)은 네트워크 분석 방법론을 활용하여 중국 철도망의 노드 중심성과 평균 경로 거리와 같은 구조적 특성을 파악하였다. Sun et al. (2019)은 중국 내 철도 물류 수송 네트워크에서 중요한 위치에 있는 지역을 확인하고 노드 중심성에 영향을 미치는 요인을 식별하였다. Chang and Kim (2022)은 북한 철도망을 대상으로 중심성 분석을 수행하여 정책적, 전략적으로 중요한 지역을 분석하였다. 국내 연구로는 노드 중심성 지표를 활용하여 수도권 지하철 네트워크의 특성과 주요 노드를 분석한 사례가 있다(Lee and Lee, 2017).

기존 연구들은 철도망 발달과 토지이용, 인구 등 도시 구조의 변화를 분석하는 것에 초점을 두었다. Chen et al. (2018)은 중국의 고속철도망 확장에 따른 철도 네트워크의 노드 중심성 변화를 분석하였다. 연구 결과 중국의 고속철도망은 주로 인구가 많고 경제가 번성하는 도시 위주로 공급되었음을 발견하였다. Jiao et al. (2017)은 여객 철도 네트워크를 대상으로 10년 간의 고속철도망 발전이 도시 간 전반적인 연계성 변화와 위계 차이에 미치는 영향을 파악하였다. Cats (2017)은 시계열 분석을 바탕으로 스톡홀름의 철도 네트워크 내 노드 간 위계, 통행 거리 및 통행 시간이 어떻게 변화하였는지 조사하였다. 이를 통해 철도 네트워크의 변화 패턴과 전환점을 식별하고 도시 개발 정책 및 도시 구조 변화와의 관계를 파악하였다. Chakrabarti et al. (2022)은 인도의 도로망과 집값의 관계를 분석하였다. 홍성표 외(2015)는 서울 지하철역을 대상으로 노드 중심성을 산출하고, 중심성 값을 바탕으로 역세권 토지이용 패턴과의 관계를 분석하였다. 연구 결과 상업 용도나 주거용도 등 토지 용도별로 중심성 순위가 상이하게 나타났으며 이를 통해 네트워크 중심성이 토지이용 용도에 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

[표 2-3] 철도 네트워크의 중심성 선행연구

출처	연구주제	중심성 지표
Cao et al. (2019)	· 중국 철도 네트워크의 구조적 특성 파악	· 연결정도 · 연결강도 · 매개 · 근접
Sun et al. (2019)	· 중국 화물 네트워크에서의 주요 노드 및 중요도에 영향을 미치는 요인 분석	· 페이지랭크 (PageRank)
Chang and Kim (2022)	· 북한 철도망의 노드 중심성 분석	· 연결강도 · 매개 · 근접
Lee and Lee (2017)	· 수도권 지하철망 특성 분석	· 연결정도 · 매개 · 근접
Chen et al. (2018)	· 중국 고속철도 네트워크 발전에 따른 구조적 특성 변화 분석	· 연결정도 · 연결강도 · 매개 · 근접
Jiao et al. (2017)	· 고속철도망 발전이 도시 간 구조 및 연계성 변화에 미치는 영향	· 연결정도 · 매개 · 근접
Cats (2017)	· 스톡홀름 철도 네트워크의 위계 변화	· 연결정도 · 매개 · 근접
Chakrabarti et al. (2022)	· 노드 중심성을 활용한 인도 도로망과 주택가격의 관계	· 매개 · 근접 · 아이겐벡터 (Eigenvector)
홍성표 외(2015)	· 수도권 도시철도 역별 중심성에 따른 토지이용패턴 분석	· 연결정도 · 매개 · 근접

제 3 절 기존 연구 시사점 및 본 연구의 차별성

기존 연구들을 고찰한 결과 철도 서비스의 공간적 형평성을 분석하는 연구들은 대부분 소득, 인구 등 사회경제적 특성이나 통행시간 등 통행저항을 활용하고 있어 철도의 구조적 특성을 다루었다고 보기는 어렵다.

본 연구는 네트워크 이론 중 하나인 노드 중심성을 바탕으로 철도 공급 및 수요 측면에서 지역 불균형을 다룬다는 점에서 기존 연구와 차별성을 지닌다. 노드 중심성은 네트워크의 연결성, 매개성 등 네트워크 특성을 나타내는 지표로서 네트워크 분석에서 많이 사용되며, 노선 수, 거리, 비용 등 가중치를 다양하게 설정할 수 있어 기존 접근성 지표와 같이 경제활동기회나 소득 등 외부 요인을 포함하지 않고 네트워크 특성 그 자체를 나타낼 수 있는 지표이다. 네트워크 이론을 바탕으로 교통망을 분석하고 공간적 형평성을 평가한 연구들은 드물다(Liu et al. 2020).

제 3 장 자료 및 연구방법론

본 장에서는 분석에 필요한 자료와 연구방법론을 제시한다. 본 연구는 네트워크 분석 방법론 중 하나인 노드 중심성을 적용하며, 지니 계수(Gini coefficient)와 LISA(Local Indicator of Spatial Autocorrelation)를 활용해 공간적 형평성을 측정한다.

네트워크는 제2장에서 서술했듯이 일련의 노드(node)와 링크(link)로 구성된다. 노드는 네트워크를 구성하는 점(또는 개체)를 의미하며, 링크는 노드 간을 연결하는 요소를 말한다. 따라서 연구 방법론을 제시하기 앞서 분석 범위에 포함되는 노드와 링크 두 자료를 정의하여야 한다. 본 연구의 분석 대상인 지역 간 철도 네트워크에서의 기본적인 노드 및 링크 정보는 [표 3-1]과 같다. 2011년에 비해 2020년의 지역 간 철도가 정착하는 역의 개수는 감소하였지만, 기초자치단체 기준의 노드 및 링크의 개수는 증가하였다. 2020년 기준으로 전국에서 약 45%의 지역에 철도망이 구축되어 있다.

[표 3-1] 노드 중심성 분석에 포함되는 노드 정보

(단위: 개)

구분	2011년	2020년
노드	철도역	216
	기초자치단체(시·군·구)	94
링크	112	138

1. 노드

교통 네트워크에서 노드는 일반적으로 버스정류장, 철도역, 교차점 등으로 정의된다. 연구 목적에 따라 도시나 국가 등도 노드로 고려될 수 있다(Chang and Kim, 2022).

본 연구의 기본 노드 단위는 기초자치단체(시·군·구)이며, 2020년 기준으로 226개의 행정구역이 존재한다. 시·군·구 단위로 도출한 중심성

값을 바탕으로 시·군·구 간 격차를 분석한다. 그러나 노드 중심성 분석은 지역 간 철도가 정착하는 지역만을 대상으로 수행한다. 철도역이 정착하지 않는 지역의 경우에는 중심성 값이 0이므로 분석 결과에 영향을 미치지 않는다.

2. 링크

링크는 노드 간을 연결하는 요소로 링크의 방향과 가중치 유무에 따라 퍼포먼스가 달라질 수 있다. 네트워크는 링크에 방향을 지정하는 방향성 네트워크(directed network)와 방향성이 없는 무방향성 네트워크(undirected network)로 나눌 수 있다. 철도 네트워크는 일반적으로 노드 간 상·하행을 모두 운영하므로 무방향성 네트워크의 특성을 나타낸다.

네트워크는 링크 가중치 유무에 따라 이항 네트워크(binary network) 또는 가중 네트워크(weighted network)로 분류되며, 본 연구는 가중 네트워크를 바탕으로 분석을 수행한다. 이항 네트워크에서는 모든 링크가 동일한 영향력을 가지지만, 가중 네트워크에서는 더 큰 가중치를 가진 링크일수록 네트워크에서 더 큰 영향력을 행사한다. 실제 네트워크에서는 노드 간의 관계, 즉 링크마다 이질성을 나타내므로 링크 가중치를 설정하는 것이 더 현실적인 분석 결과를 제공할 수 있다(Lin and Ban, 2013; Barrat et al., 2004).

1) 기존 연구의 링크 가중치

[표 3-2]에서 볼 수 있듯이 교통 네트워크를 대상으로 중심성 분석을 수행한 연구들은 다양한 요소를 링크 가중치로 설정하고 있다. Chang and Kim (2022)은 공급 및 수요의 간접 지표인 노선 수를 링크 가중치로 설정하였다. Liu et al. (2020)와 Cats (2017)은 통행시간을, Cats (2017)은 일반화비용을 적용하였다. Lee and Lee (2017), Soh et al. (2010), Sun et al. (2019)에서는 수요 지표인 승객 수를 적용하였다. Chakrabarti et al. (2022)은 통행시간과 통행거리를 함께 고려하였다. Chen et al. (2018)와 같이 노선 수, 거리, 인구 및 소득 등 공급 수준,

서비스 수준, 사회경제지표 등을 모두 고려하는 경우도 있다.

[표 3-2] 기존 연구의 링크 가중치

출처	노드	가중치
Lee and Lee (2017)	· 지하철역	· 승객 수
Cats (2017)	· 철도역	· 차내 통행 시간 · 일반화 비용
Soh et al. (2010)	· 버스 정류장 및 · 철도역	· 이용객 수
Chang and Kim (2022)	· 철도역 · 지역	· 노선 수
Sun et al. (2019)	· 도시	· 수송 물동량
Cao (2019)	· 도시	· 운행빈도
Wang et al. (2011)	· 도시	-
Wei et al. (2019)	· 철도역	-
Chen et al. (2018)	· 지역	· 노선 수 · 노선 등급 · 거리 · 속력 · 인구 및 소득
Liu et al. (2020)	· 지역	· 일일 운행빈도 · 통행시간
Chakrabarti et al. (2022)	· 지역	· 첨두시 통행시간 · 통행거리

2) 본 연구의 링크 가중치

본 연구는 철도 네트워크를 공급과 수요 양 측면에서 모두 분석하므로 링크 가중치를 공급지표와 수요지표로 나누어 설정한다.

$$\begin{aligned}w_{supply} &= \alpha \cdot F_{ij} \\w_{demand} &= \alpha \cdot D_{ij}\end{aligned}\tag{3-1}$$

공급 중심성의 가중치 F_{ij} 는 지역별 열차의 운행빈도(회/일)를 의미하며, 수요 중심성의 링크 가중치 D_{ij} 는 구간별 재차인원이다. 자료는 각각 코레일 및 SR의 운행시간표자료와 철도통계연보를 통해 수집하였다.

파라미터 α 는 고속철도와 일반철도를 구분하는 상대적 가중치를 부여하기 위해 설정된다. 예컨대 고속철도가 하루에 3번 다니는 지역과 일반철도가 하루에 3번 다니는 지역의 공급 수준은 동일하다고 볼 수 없다. 파라미터는 운임을 기준으로 설정하며, 노선별 운임은 국토교통부고시 철도운임상한^⑦을 기준으로 고속철도노선 164.41원/km, 일반철도노선 108.02원/km이다. 이에 α 은 각각에 대한 가중 평균 값으로 고속철도노선은 0.60, 일반철도노선은 0.40이 적용된다. 법령 기준의 철도운임상한을 기준으로 설정하는 이유는 각 링크 구간마다 운임이 다르고 KTX/SRT, 새마을/ITX-새마을/무궁화 등 차종이 다양하기 때문에 모든 링크에 단일하게 적용할 수 있는 명확한 기준을 설정하기 위해서이다.

⑦ 국토교통부, 「고시 제2016-510호(2016.07) 철도여객운임의 상한지정 고시」, http://www.molit.go.kr/USR/I0204/m_45/dtl.jsp?gubun=&search=&search_dept_id=&search_dept_nm=&old_search_dept_nm=&psize=10&search_regdate_s=&search_regdate_e=&srch_usr_nm=&srch_usr_num=&srch_usr_year=&srch_usr_titl=&srch_usr_ctnt=&lcmspage=169&idx=14519#
(접속일자: 2022년 11월 17일)

제 3 절 연구방법론

1. 노드 중심성

노드 중심성(Node Centrality)은 네트워크 분석의 기본 개념 중 하나로 네트워크 내에 존재하는 노드 간의 위계를 평가하여 각 노드의 상대적 영향력을 판별하는 방법론이다(Lin and Ban, 2013; Lange, 2019). 중심성의 의미는 바라보는 관점에 따라 달라지기 때문에 연구자가 연구 목적에 따라 다양한 지표를 설정할 수 있다. 일반적으로 가장 널리 사용되는 중심성 지표는 Freeman(1978)이 제안한 연결정도 중심성, 매개 중심성, 그리고 근접 중심성이다.

연결정도 중심성(Degree Centrality) C_D 은 노드의 연결성(connectivity)을 평가하는 지표로 식 (3-2)와 같이 노드에 연결된 링크 개수를 바탕으로 중심성을 측정한다(Freeman, 1978).

$$C_D(i) = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (3-2)$$

여기서, 노드 i 와 j 를 연결하는 링크가 존재하는 경우 $a_{ij} = 1$ 이며 존재하지 않으면 $a_{ij} = 0$ 이다.

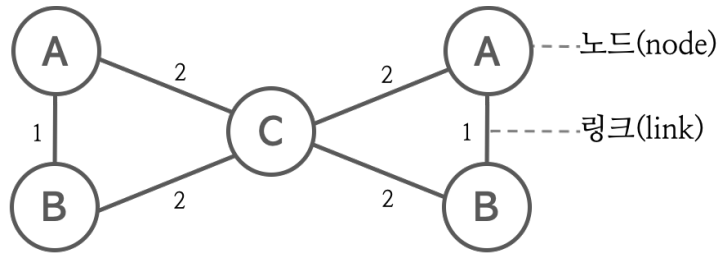
<그림 2-1>에서 노드 C의 경우 총 4개의 링크가 인접하고 있으므로 노드 C의 연결정도 중심성은 4가 된다. 그러나 연결정도 중심성은 이항 네트워크에서만 표현할 수 있는 지표로서 가중치를 계산하지 못하는 문제점이 있다.

따라서 본 연구는 가중네트워크에서 적용할 수 있는 Opsahl et al. (2020)의 연결강도 중심성(Strength Centrality) C_S 을 활용한다. $C_S(i)$ 는 노드 i 가 인접하고 있는 노드와의 링크 가중치 w_{ij} 를 합하여 산정하며, 식 (3-3)와 같이 나타낸다.

$$C_S(i) = \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (3-3)$$

연결강도 중심성은 직접적으로 인접하고 있는 노드와의 연결성, 연계성을 의미한다. 따라서 연결강도 중심성이 높은 노드는 주변 노드와의 관계에서 허브 역할을 한다고 볼 수 있다.

매개 중심성(Betweenness Centrality) C_B 와 근접 중심성(Closeness Centrality) C_C 는 최단 경로(shortest path)를 바탕으로 산정한다. 이항 네트워크에서 인접하고 있는 노드 간의 거리(distance)는 기본적으로 1로 설정되지만, 가중네트워크에서는 Dijkstra (1959)의 최단 경로 알고리즘을 바탕으로 링크가중치의 역수가 거리로 설정된다(Opsahl et al. 2010). 예를 들어 통행량이 가중치인 경우에는 통행량이 많을수록 노드 간 거리가 가깝고 통행량이 적을수록 지역간 거리가 먼 것으로 해석된다.



[그림 3-1] 가중네트워크 예시

[그림 3-1]은 가중네트워크의 예시이며, 링크 가중치가 없는 이항네트워크 [그림 2-1]와 달리 링크에 가중치가 존재한다. 가중네트워크와 이항네트워크의 노드 A와 B 간의 거리를 비교한 결과는 [표 3-3]와 같다.

[표 3-3] 거리(distance) 산출 예시

경로	$d(A, B)$	$d^w(A, B)$
(A, B)	1	1
(A, C, B)	2	4

가중 매개 중심성 C_B^w 은 네트워크 내에서 노드 h 를 지나가는 가중 최단 경로(weighted shortest path)의 개수를 바탕으로 산출하며, 식 (3-4)와 같이 측정할 수 있다. 즉, 네트워크 내의 특정 노드가 다른 노드

간의 최단 경로에 포함되어 있는 비율로 중요도를 판별하는 지표이다. 교통 네트워크에서는 여객 또는 물류 흐름을 통제할 수 있는 능력을 뜻한다(Kitsak et al., 2010; Freeman, 1977).

$$C_B^w(i) = \sum_{j \neq k} \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}} \quad (3-4)$$

g_{jk} = 노드 j 와 노드 k 간의 최단 경로의 수
 $g_{jk}(i)$ = 노드 i 를 통과하는 두 노드 j, k 간의 최단 경로의 수

식 (3-5) 로 표현되는 가중 근접 중심성 C_C^w 는 해당 네트워크 내에서 노드 i 와 다른 모든 노드 간의 최단 가중 경로 거리의 합을 바탕으로 측정할 수 있다(Freeman, 1978). 근접 중심성 값이 큰 노드는 네트워크 내에 있는 다른 모든 노드로부터 가장 짧은 거리에 위치하고 있는 것을 의미하므로, 네트워크 내 모든 노드로 접근이 가장 쉽고 쉽다는 것을 의미한다. 교통망에서는 접근성을 나타내는 지표로 활용된다(Bohman and Nilsson, 2021; Zhai et al., 2021). 다만, 이 때의 접근성은 두 노드 간을 빠르게 이동하는 것을 의미하므로, <표 2-1>에서 제시하고 있는 활동기회에 대한 접근성의 관점과는 차이가 있다. Levinson and King (2020)의 정의에 따르면 접근성(accessibility)보다는 이동성(mobility)에 가까운 정의이다^⑧.

$$C_C^w(i) = \left[\sum_j^N d^w(i, j) \right]^{-1} \quad (3-5)$$

h = 노드 i 와 노드 j 사이에 있는 노드

정리하자면 본 연구에서 사용하는 세 가지의 중심성 지표의 산정

^⑧ 이동성은 두 노드 간을 빠르게 이동하는 기능을 의미하는 개념이고, 접근성은 토지, 이용시설물에 용이하게 접근하는 것을 의미한다.

방법과 각 지표들이 교통망에서 가지는 의미는 [표 3-6]과 같다.

[표 3-4] 중심성 지표 정리

구분	산정방법	의미
연결강도 중심성	· 인접 노드와의 링크가중치의 합	· 주변 지역과의 연계성 · 인접지역과의 교류 활발
매개 중심성	· 노드 사이를 이동할 때 특정 노드를 통과해서 지나가는 비율	· 환승 허브(transit-point)
근접 중심성	· 네트워크 내 모든 노드와의 거리의 합	· 네트워크 전체 내에서의 이동성(mobility)

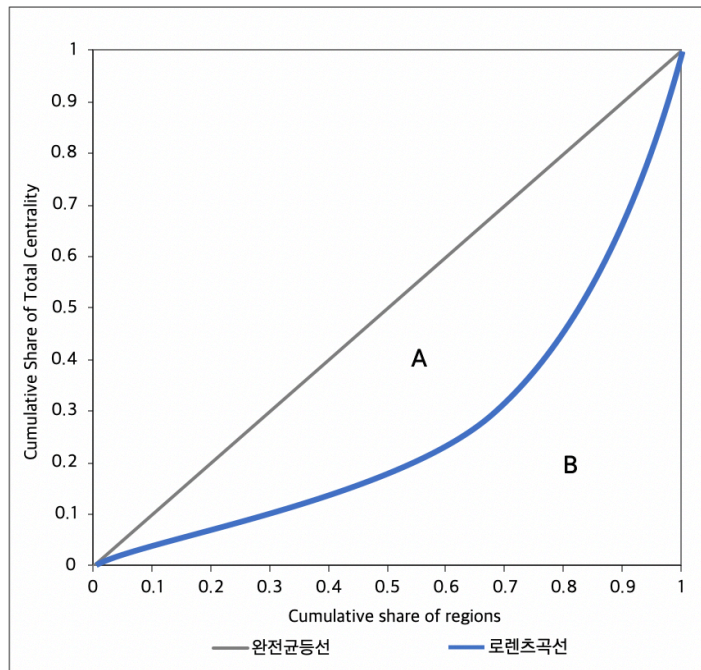
2. 지니계수

불균등 지수를 산정하는 방법으로는 변이계수, 지니계수, 타일 지수 등이 있으며, 가장 일반적으로 사용되는 방법은 지니계수(Gini Coefficient)이다. 지니계수는 0과 1사이의 값을 가지며, 0에 가까울수록 평등한 상태, 1에 가까울수록 불평등이 심한 상태를 의미한다.

$$G = \frac{1}{2\mu} \frac{\sum_i \sum_j |x_i - x_j|}{n^2} \quad (3-6)$$

x = 각 지역의 중심성 값, n = 노드 개수,
 μ = 전체 평균 중심성 값

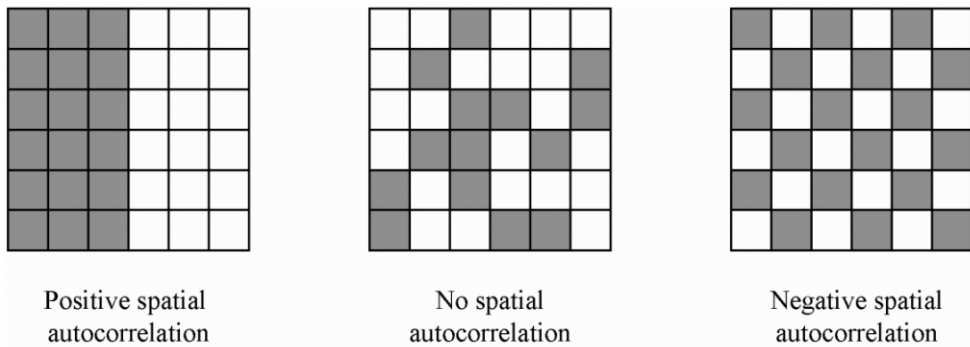
지니계수는 로렌츠 곡선(Lorenz Curve)을 바탕으로 산정한다. [그림 3-2]에서 회색선은 완전 균등선을 의미하고, 파란 실선은 로렌츠 곡선이다. 지니계수 G 는 $A/(A+B)$ 를 통해 산출된다. A 는 완전 균등선과 로렌츠 곡선 사이의 면적을 나타내고, B 는 로렌츠 곡선 아래의 면적을 나타낸다.



[그림 3-2] 로렌츠곡선

3. LISA 분석

본 연구는 공간 자기상관을 바탕으로 지역별 중심성의 공간 집중도를 분석한다. 공간자기상관을 위한 분석법으로는 Global Moran's I 지수가 가장 널리 사용되고 있다(Moran, 1950). 전역적 모란지수는 [그림 3-3]과 같이 특정 현상의 분포가 공간적으로 상호연관성을 가지는지 또는 무작위로 분포되어 있는지를 나타내는 지표이다.



[그림 3-3] 공간적 자기상관(출처: Radil, 2011)

그러나, 전역적 모란지수(Global Moran's I)는 공간집중도의 유무를 -1과 1 사이의 값으로 표현할 뿐 이것이 지리적으로 어떻게 분포되어 있는지 보여주지 못한다. 본 연구는 중심성의 분포가 규칙적으로 분포되어 있는지를 분석하기 보다는 어느 지역에 공간집중도가 존재하는지를 파악하는 데 목적이 있다. 따라서 전역적 모란지수를 보완한 Anselin (1995)의 Local Moran's I 지수(LISA; Local Indicator of Spatial Autocorrelation)을 바탕으로 공간집중도를 산정한다. 국지적 모란지수는 개별 지역 단위로 공간 집중도를 파악하는 방법론으로, 중심지역과 인접지역의 유사성을 나타낸다(채정은 외, 2014). 해당 분석법은 Global Moran's I 통계량(Moran, 1950)과 다르게 지리적 시각화가 가능하기 때문에 핫 스팟과 콜드 스팟을 발견할 수 있는 장점이 있다. 핫 스팟은 중심성이 높은 지역의 군집 정도가 높은 것을 의미하고, 반대로 콜드 스팟은 군집 정도가 작은 것을 의미한다.

본 연구에서는 일변량 LISA분석과 이변량 LISA분석을 사용한다. 식

(3-7)은 일변량 LISA분석(Univariate LISA analysis)을 나타내는데, 변수가 한 개 일 때 해당 변수의 공간적 자기 상관을 분석하는 방법이다. 즉, 중심성이 높거나 낮은 지역끼리의 집중 정도를 파악하는 데 활용된다.

$$I_i = \frac{(Z_i - \bar{Z})}{S_z^2} \cdot \sum_{j=1}^n [w_{ij}(Z_j - \bar{Z})] \quad (3-7)$$

S_z^2 = 분산, Z_i = 지역 i 의 중심성,
 w = 공간가중치 행렬

LISA분석을 통해 인접지역과 해당 지역의 공급 수준이 차이를 확인할 수 있으며, 네 가지의 공간적 분포 유형을 발견할 수 있다. 일변량에서 각각의 유형은 다음과 같이 해석된다. HH (high-high)인 지역은 중심성이 높은 밀집 지역으로 볼 수 있고, 중심성이 낮은 지역들이 집중되어 있으면 LL (low-low)로 나타난다. 반면 HL (high-low)와 LH (low-high)은 각각 해당 지역의 중심성은 높으나 주변 지역의 중심성이 낮은 경우, 그리고 해당 지역의 중심성은 낮으나 주변 지역의 중심성은 높은 경우를 의미한다.

이변량 LISA분석(Bivariate LISA analysis)은 두 개의 변수에 대해 변수 사이의 공간 자기상관을 파악하는 방법으로 식 (3-8)과 같이 정의된다. 이변량 분석을 통해서는 공급중심성과 수요중심성이 일치하지 않는 이상치(outliers)를 가진 지역을 판별할 수 있다. 그러나, 이변량 국지모란지수 자체가 두 변수 사이에 상관관계가 존재한다는 것을 입증해주지는 않는다. 이에 따라 이변량 국지모란지수 분석 결과가 타당성을 갖기 위해서는 별도의 상관관계 분석을 통해 두 변수의 상관관계를 확인할 필요가 있다.

$$I_i = \frac{(Z_i - \bar{Z})}{S_z^2} \cdot \sum_{j=1}^n [w_{ij}(Y_j - \bar{Y})] \quad (3-8)$$

S_z^2 = 분산,
 Z_i = 지역 i 의 공급중심성, Y_i = 지역 i 의 수요중심성,
 w = 공간가중치 행렬

이변량 분석에서의 네 가지 유형은 다음과 같은 의미를 가진다.

- ① HH (high-high): 공급중심성과 수요중심성이 모두 높은 지역
- ② LL (low-low): 공급중심성과 수요중심성이 모두 낮은 지역
- ③ HL (high-low): 주변 지역보다 상대적으로 공급중심성은 높지만 수요중심성은 낮은 지역
- ④ LH (low-high): 주변 지역보다 상대적으로 공급중심성은 낮지만 수요중심성은 높은 지역

제 4 장 분석 결과

본 연구는 지역별 중심성 결과를 바탕으로 공간적 형평성을 평가한다. 공간적 형평성 분석 방법론은 비공간 통계량인 지니계수와 공간 통계량인 LISA분석을 활용한다. 첫째, 지니계수를 통해 10년 전후의 형평성 지수를 비교한다. 그러나 지니 계수만으로는 중심성이 지리적으로 어떤 패턴을 보여주는지 알 수 없으므로, 시각화가 가능한 공간적 자기상관(spatial autocorrelation) 분석법을 활용하여 노드 중심성의 공간적 분포를 파악한다.

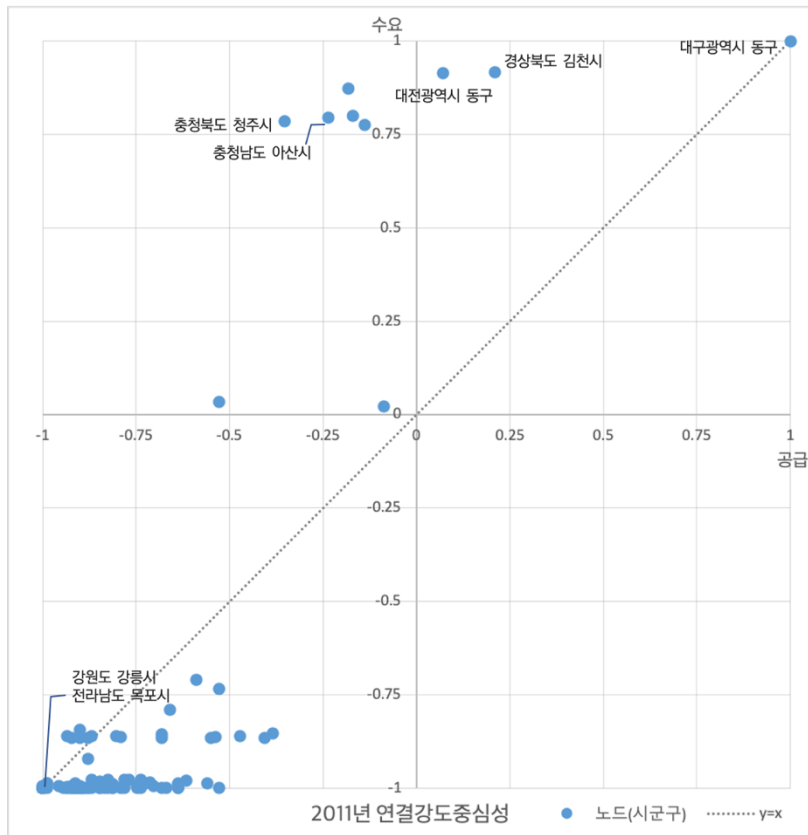
제 1 절 노드 중심성

1. 지역별 중심성 분석 결과

지역별 중심성 분석 결과는 데카르트 좌표계를 바탕으로 제시한다. 사분면을 활용할 경우 공급중심성과 수요중심성을 함께 고려할 수 있는 장점이 있다. 이를 통해 첫째, 각 지역별로 공급중심성과 수요중심성의 격차를 알 수 있다. 둘째, 실제 수요에 비해 공급 수준이 낮은 지역을 알 수 있으므로 철도망의 우선 투자가 필요한 지역을 식별할 수 있다. 각각의 중심성 지표는 결과 값의 범위가 상이하기 때문에, 이들을 상호 비교하고 좌표 상에 나타내기 위해 값을 $[-1, 1]$ 범위로 나타내는 Max-Abs Scaling를 수행하였다.

$$x_{scaled} = \frac{x}{\max(|x|)} \quad (4-1)$$

1) 연결강도 중심성(Strength Centrality)



[그림 4-1] 2011년 연결강도 중심성 사분면 분석 결과

연결강도 중심성은 인접 노드와의 링크 가중치의 합을 바탕으로 산출되며, 순위가 높으면 중심 지역에서 주변 지역으로의 이동이 활발한 것을 의미한다.

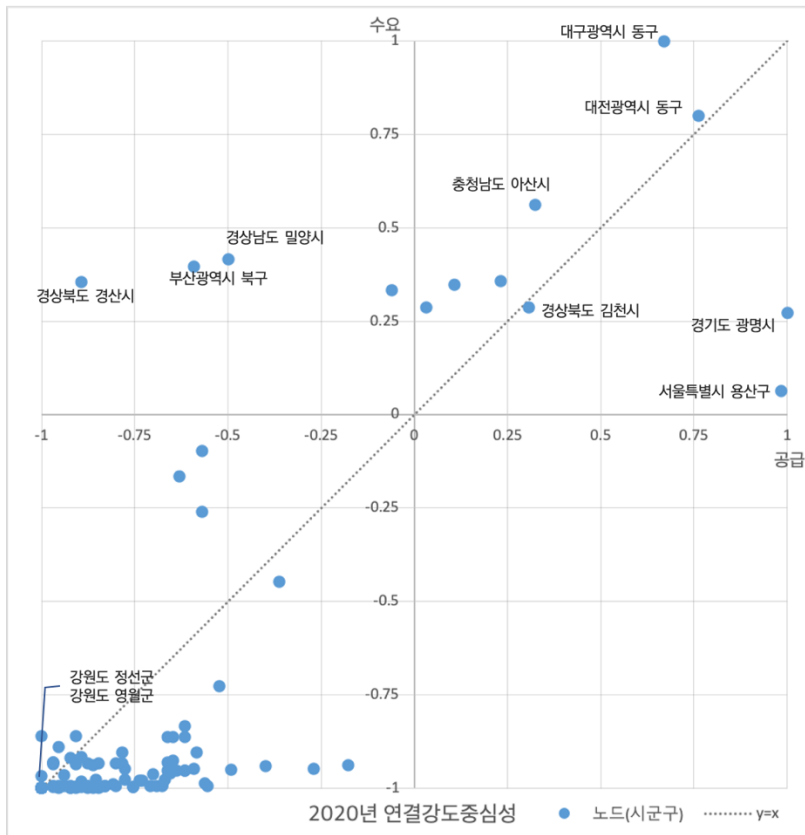
2011년 연결강도 중심성 분석 결과, [그림 4-1]과 같이 대구광역시 동구가 공급과 수요 모두 가장 높은 수준을 보이는 것으로 분석되었다. 좌표 상에서 점선 $y=x$ 상에 있는 노드들은 공급과 수요가 일치하는 것을 의미한다. 해당 선에 가까울수록 공급과 수요 중심성 간의 차이가 적은 것을 나타낸다. 대구광역시 동구는 $y=x$ 선 위에 있으므로 공급과 수요 중심성 간 격차가 없다. 대구광역시 외에도 경상북도 김천시, 대전광역시 동구 등 경북권과 충청권의 연결강도 중심성이 상위 노드에

분포하고 있는 것을 알 수 있다. 당시 경부축을 중심으로 공급망이 형성되었기 때문에 경부선이 지나가는 지역의 중심성이 높은 것으로 이해된다. 반면, 충청북도 청주시와 충청남도 아산시는 제2사분면에 위치하고 있는데, 2사분면은 여객 수요에 비해 실제 철도망의 공급 수준은 낮은 것을 의미한다. 이를 통해 2011년에는 충청권 중심의 공급수준을 개선할 필요가 있었음을 알 수 있다.

[표 4-1] 2011년 연결강도 중심성 순위

순위	2011년 연결강도 중심성	
	공급	수요
1	대구광역시 동구(1.00000)	대구광역시 동구(1.00000)
2	경상북도 김천시(0.60440)	경상북도 김천시(0.95774)
3	대전광역시 동구(0.53571)	대전광역시 동구(0.95724)
4	서울특별시 용산구(0.45604)	울산광역시 울주군(0.93604)
5	경기도 광명시(0.43132)	경상북도 경주시(0.90014)
6	경상북도 경주시(0.41484)	충청남도 아산시(0.89787)
7	울산광역시 울주군(0.40934)	충청북도 청주시(0.89261)
8	충청남도 아산시(0.38187)	경기도 광명시(0.88762)
9	충청북도 청주시(0.32418)	부산광역시 동구(0.51733)
10	충청남도 천안시(0.30769)	서울특별시 용산구(0.51090)
11	대구광역시 북구(0.29670)	경상남도 밀양시(0.14535)
12	세종특별자치시(0.26374)	서울특별시 영등포구(0.13334)
13	부산광역시 동구(0.23626)	경기도 수원시(0.10520)
14	서울특별시 영등포구(0.23636)	경상남도 김해시(0.07771)
15	전라남도 순천시(0.23626)	충청남도 천안시(0.07383)

1) 노드 중심성 값은 Min-Max Scaling 을 통해 정규화된 값임



[그림 4-2] 2020년 연결강도 중심성 사분면 분석 결과

[그림 4-2]의 2020년 연결강도 중심성 노드들은 2011년에 비해 더 분산되어 분포하고 있다. 공급 측면에서는 수도권이 상위 노드로 바뀌면서, 공급중심성과 수요중심성의 상위 노드 분포가 달라졌다. 이는 수도권을 시종점으로 하는 지역 간 철도가 많이 공급되면서 수도권의 공급 수준이 높아졌기 때문이다. 반면 대구광역시는 수도권에 공급 순위가 밀렸음에도 불구하고 수요 중심성 측면에서는 여전히 가장 높았다. 수도권은 지방도시에 비해 광역/도시철도가 많이 발달되어있어 이를 통해 지역간을 통행하는 수요가 많은 것으로 짐작된다. 연결강도 중심성은 공급이 높고 수요가 낮은 제4사분면에 위치하는 노드가 없는 것을 알 수 있다. 공급수준이 높는데 수요가 낮은 경우는 없는 것을 뜻하므로, 철도 공급수준이 잘 갖춰지면 인근 지역으로 이동할 때

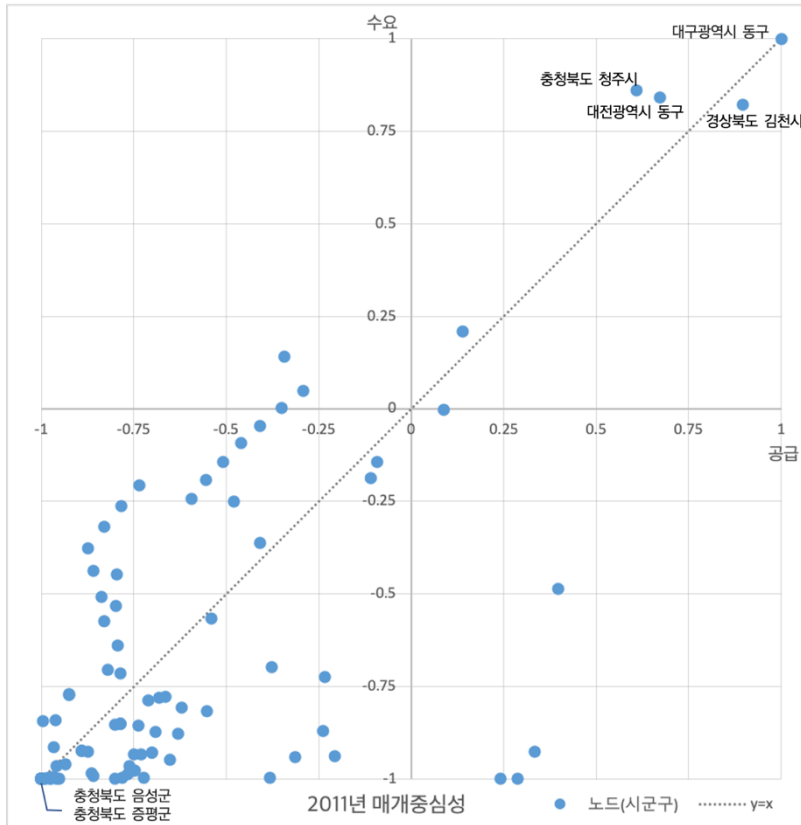
철도를 많이 이용할 것으로 예상할 수 있다.

[표 4-2] 2020년 연결강도 중심성 순위

순위	2020년 연결강도 중심성	
	공급	수요
1	경기도 광명시(1.00000)	대구광역시 동구(1.00000)
2	서울특별시 용산구(0.99231)	대전광역시 동구(0.89942)
3	대전광역시 동구(0.88077)	충청남도 아산시(0.78084)
4	대구광역시 동구(0.83462)	경상남도 밀양시(0.70735)
5	충청남도 아산시(0.66154)	부산광역시 북구(0.69833)
6	울산광역시 울주군(0.65385)	경상북도 김천시(0.67852)
7	경상북도 김천시(0.61538)	경상북도 경산시(0.67733)
8	충청북도 청주시(0.55385)	충청북도 청주시(0.67435)
9	경상북도 경주시(0.51538)	부산광역시 동구(0.66659)
10	부산광역시 동구(0.46923)	경상북도 경주시(0.64393)
11	전라북도 익산시(0.41154)	울산광역시 울주군(0.64332)
12	서울특별시 동대문구(0.36538)	경기도 광명시(0.63619)
13	경기도 화성시(0.31923)	서울특별시 용산구(0.53171)
14	전라북도 정읍시(0.30000)	경기도 수원시(0.45190)
15	강원도 원주시(0.25385)	서울특별시 영등포구(0.41750)

1) 노드 중심성 값은 Min-Max Scaling 을 통해 정규화된 값임

2) 매개 중심성



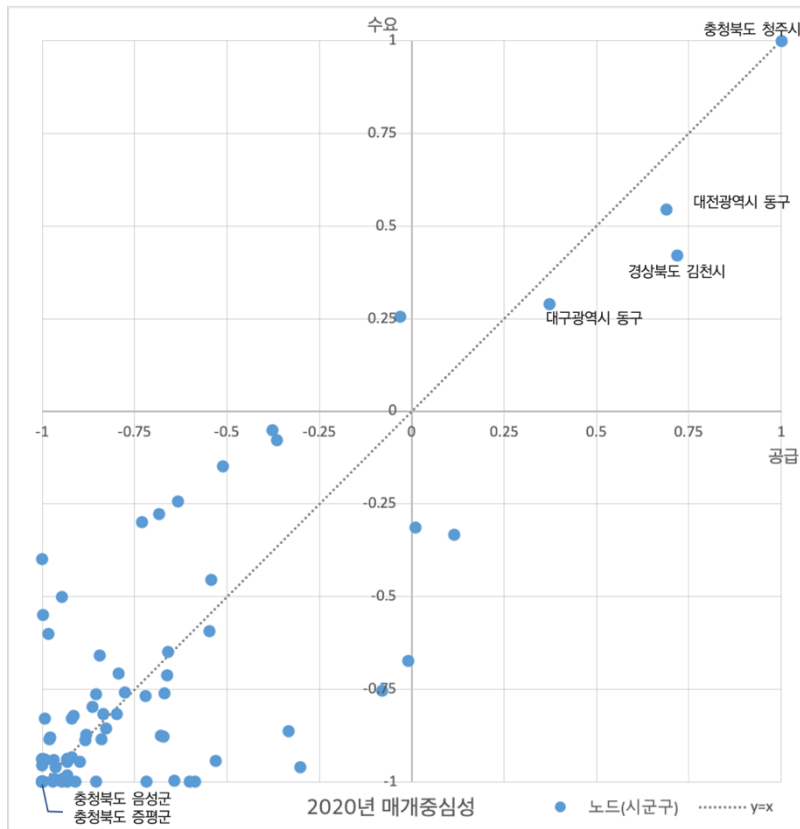
[그림 4-3] 2011년 매개 중심성 사분면 분석 결과

매개중심성은 해당 노드를 통과하는 다른 노드 간의 최단 경로를 바탕으로 산정하고, 이는 전체 네트워크 내에서 다리 역할을 하는 노드를 판별한다. 2011년 매개중심성은 대구광역시가 1위를 차지했다. 교통 네트워크에서 매개 중심성은 환승 허브를 의미한다. 다시 말해서 지리적으로 동남쪽에 위치하고 있음에도 불구하고 대구광역시를 지나는 철도 노선이 가장 많고, 통행량 또한 대구광역시를 통과하는 경우가 가장 많았음을 알 수 있다.

[표 4-3] 2011년 매개 중심성 순위

순위	2011년 매개 중심성	
	공급	수요
1	대구광역시 동구(1.00000)	대구광역시 동구(1.00000)
2	경상북도 김천시(0.94798)	충청북도 청주시(0.93056)
3	대전광역시 동구(0.83634)	대전광역시 동구(0.92075)
4	충청북도 청주시(0.80480)	경상북도 김천시(0.91054)
5	전라북도 익산시(0.69805)	경상남도 밀양시(0.60417)
6	대전광역시 중구(0.66697)	충청남도 아산시(0.57108)
7	충청남도 계룡시(0.64318)	경상남도 김해시(0.52451)
8	충청남도 논산시(0.62056)	경상남도 창원시(0.50082)
9	경상남도 밀양시(0.56974)	충청북도 충주시(0.49918)
10	충청북도 충주시(0.54350)	경상남도 함안군(0.47712)
11	충청북도 제천시(0.45382)	경상남도 진주시(0.45343)
12	경상북도 경주시(0.44503)	경상남도 사천시(0.42892)
13	세종특별자치시(0.39658)	충청북도 제천시(0.42810)
14	대전광역시 대덕구(0.38321)	경상북도 경주시(0.40605)
15	전라북도 김제시(0.38123)	경상남도 하동군(0.40400)

1) 노드 중심성 값은 Min-Max Scaling 을 통해 정규화된 값임



[그림 4-4] 2020년 매개 중심성 사분면 분석 결과

2020년은 청주시가 공급 및 수요 중심성 모두 1위를 차지하였다. 청주시에는 경부고속선과 호남고속선의 분기점인 오송역이 위치한다. 뿐만 아니라 청주시는 충청권에서 유일하게 국제공항이 위치하고 경부, 중부고속도로가 지나고 있다. 따라서 교통의 요지를 담당하고 있는 청주시에 적절한 환승허브가 구축되었다고 볼 수 있다.

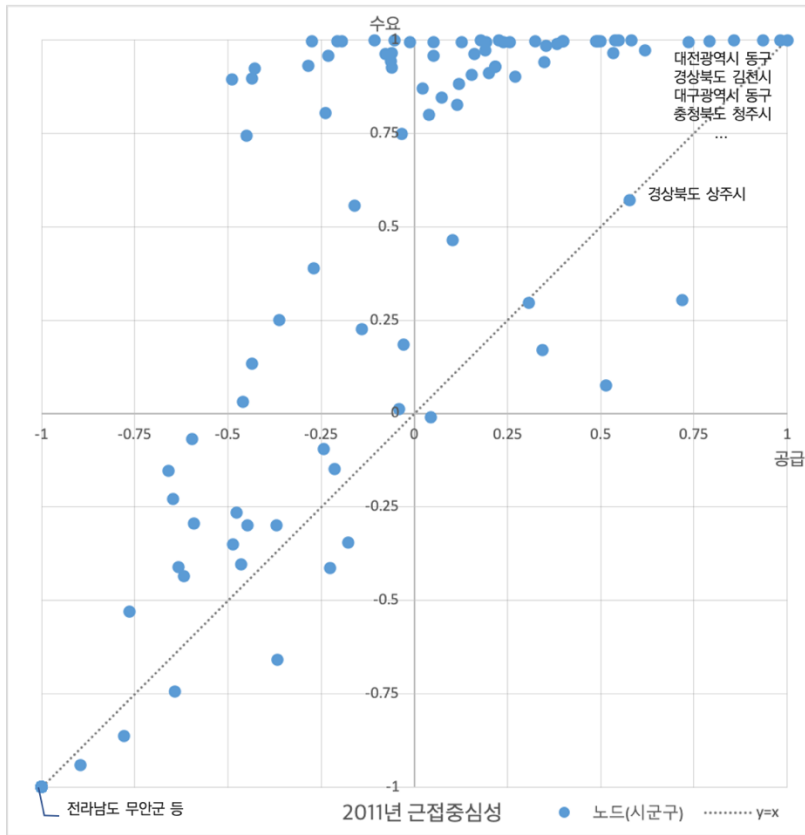
매개중심성은 다른 중심성 지표에 비해 지역들의 공급과 수요 중심성 간 격차가 적다. 이는 노선 분기점에 위치한 노드들이 실제 통행량도 많은 것을 의미한다. 또한, 매개 중심성은 2사분면에 위치하는 지역이 거의 없다. 즉, 수요에 비해 과소 공급된 지역이 적음을 의미한다. 이는 곧 지역 간 철도 네트워크에서 환승역은 비교적 합리적으로 공급되어 있음을 나타낸다.

[표 4-4] 2020년 매개 중심성 순위

순위	2020년 매개 중심성	
	공급	수요
1	충청북도 청주시(1.00000)	충청북도 청주시(1.00000)
2	경상북도 김천시(0.85915)	대전광역시 동구(0.77257)
3	대전광역시 동구(0.84507)	경상북도 김천시(0.71005)
4	대구광역시 동구(0.68697)	대구광역시 동구(0.64530)
5	전라북도 익산시(0.55739)	충청남도 아산시(0.62743)
6	충청남도 공주시(0.50458)	서울특별시 용산구(0.47400)
7	경상북도 경주시(0.49507)	경기도 광명시(0.46061)
8	충청남도 아산시(0.48486)	서울특별시 동대문구(0.42552)
9	울산광역시 울주군(0.45951)	서울특별시 중랑(0.37831)
10	부산광역시 북구(0.33310)	경기도 양평군(0.36108)
11	경기도 광명시(0.31761)	강원도 원주시(0.35024)
12	서울특별시 용산구(0.31197)	충청남도 공주시(0.34386)
13	서울특별시 동대문구(0.24401)	전라북도 익산시(0.33333)
14	경상북도 상주시(0.23486)	경상북도 경산시(0.30112)
15	경상남도 밀양시(0.22923)	경상남도 밀양시(0.27241)

1) 노드 중심성 값은 Min-Max Scaling 을 통해 정규화된 값임

3) 근접 중심성



[그림 4-5] 2011년 근접 중심성 사분면 분석 결과

근접 중심성은 전국에서 각 지역으로 가장 이동하기 쉬운 이동성(mobility)이 좋은 지역을 식별하는 지표이다. 2011년에는 대전광역시와 경상북도 김천시가 1,2위를 차지하고 있다. 다른 중심성 지표들과 마찬가지로 경부선이 지나가는 지역들의 접근성이 좋은 것을 확인할 수 있다. 근접 중심성에서는 공급중심성의 값이 수요측면보다 분산되어 있으며, 대부분 노드들이 수요 중심성 값이 크고 간격이 매우 좁게 몰려 있다. 근접중심성은 각 노드에서 다른 노드들까지의 거리의 합으로 측정되기 때문에 지리적으로 가까운 지역들은 유사한 중심성 값을 가지기 때문이다(Chang and Kim, 2022).

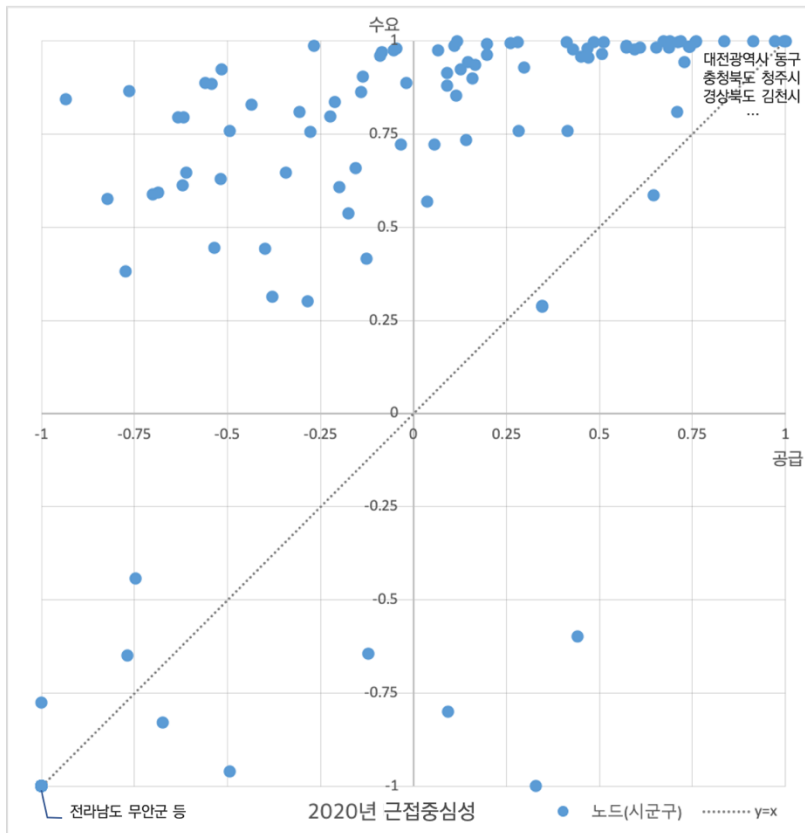
2011년 근접중심성 분석 결과 2사분면에 위치하는 지역들은

26곳으로, 수도권 5곳, 부산광역시 및 경상남도 14곳, 경상북도 1곳, 전라남도 2곳, 전라북도 3곳, 그리고 충청남도 1곳이다. 특히 지리적으로 끝에 있는 부산광역시의 수요 중심성이 0.9이상인데 공급 중심성은 -0.4 미만으로 공급과 수요 중심성 간 격차가 가장 크다. 전라남도 또한 지리적으로 끝에 있음에도 불구하고 수요는 0.1 전후로 훨씬 낮으므로, 부산광역시가 가장 우선 투자되어야 하는 지역이었던 것으로 볼 수 있다([부록 1] 참조).

[표 4-5] 2011년 근접 중심성 순위

순위	2011년 근접 중심성	
	공급	수요
1	대전광역시 동구(1.00000)	경상북도 김천시(1.00000)
2	경상북도 김천시(0.99026)	대전광역시 동구(0.99999)
3	충청북도 청주시(0.96798)	대구광역시 동구(0.99999)
4	대구광역시 동구(0.92816)	충청북도 청주시(0.99997)
5	대전광역시 대덕구(0.89594)	경상북도 경주시(0.99990)
6	세종특별자치시(0.86777)	충청남도 아산시(0.99989)
7	대전광역시 중구(0.85951)	울산광역시 울주군(0.99980)
8	충청북도 충주시(0.80923)	경기도 광명시(0.99978)
9	경상남도 밀양시(0.79153)	부산광역시 동구(0.99969)
10	경상북도 상주시(0.78903)	서울특별시 용산구(0.99966)
11	충청남도 아산시(0.77425)	경상남도 밀양시(0.99924)
12	경상북도 경주시(0.76938)	서울특별시 영등포구(0.99885)
13	경상북도 영천시(0.76697)	대전광역시 대덕구(0.99844)
14	충청남도 계룡시(0.75737)	경상북도 구미시(0.99836)
15	충청북도 옥천군(0.75026)	충청북도 옥천군(0.99836)

1) 노드 중심성 값은 Min-Max Scaling 을 통해 정규화된 값임



[그림 4-6] 2020년 근접 중심성 사분면 분석 결과

2020년 근접중심성 결과 또한 2011년과 사분면 분포 및 상위 노드가 유사하다. 최근 10년동안 기존 호남선, 전라선 등 일반 노선에서 고속선이 추가로 개통되고, 동해선 등 신규노선이 공급되었음에도 불구하고 여전히 경부축 지역들의 중심성이 가장 높게 도출되었다. 이는 SRT를 공급을 할 때 호남선보다 경부선에 2배의 열차를 운행하는 등 실질적인 서비스 수준에 차이를 두었기 때문이다. 반면, 제2사분면에 위치하는 노드 개수는 38개로 2011년보다 더 증가하였다. 특히 2020년 부산은 공급 수준과 수요의 격차가 줄어든 반면, 전라남도의 수요가 2011년에 비해 증가하였다([부록 2] 참조). 2011년 이후 부산광역시의 이동성은 개선되었으나, 전라남도는 늘어난 수요에 비해 아직 서비스 공급이 부족한 것을 알 수 있다.

[표 4-6] 2020년 근접 중심성 순위

순위	2020년 근접 중심성	
	공급	수요
1	대전광역시 동구 (1.00000)	대전광역시 동구(1.00000)
2	충청북도 청주시(0.99810)	충청북도 청주시(0.99991)
3	경상북도 김천시(0.98593)	충청남도 아산시(0.99977)
4	대구광역시 동구(0.95631)	경상북도 김천시(0.99972)
5	경상북도 경주시(0.91762)	대구광역시 동구(0.99946)
6	충청남도 아산시(0.87987)	경기도 광명시(0.99945)
7	울산광역시 울주군(0.87887)	경기도 수원시(0.99927)
8	충청북도 옥천군(0.87163)	서울특별시 용산구(0.99913)
9	대전광역시 대덕구(0.87016)	경상북도 경산시(0.99904)
10	경상북도 포항시(0.86466)	경상북도 경주시(0.99901)
11	경기도 광명시(0.85927)	서울특별시 영등포구(0.99880)
12	경상북도 영천시(0.85431)	경상남도 밀양시(0.99863)
13	서울특별시 용산구(0.84434)	울산광역시 울주군(0.99856)
14	충청남도 천안시(0.84359)	경기도 평택시(0.99856)
15	경기도 수원시(0.83627)	부산광역시 북구(0.99817)

1) 노드 중심성 값은 Min-Max Scaling 을 통해 정규화된 값임

2. 공급중심성과 수요중심성의 상관관계

공간적 형평성을 분석하기에 앞서 공급중심성과 수요중심성의 상관관계를 분석하였다. 교통망의 공급 수준과 수요 사이의 인과관계에 관한 해석은 연구자마다 다르지만, 공급과 수요가 상관관계에 있다는 것은 명확한 사실이다(Nie et al., 2022). 또한, 이변량 국지적 Moran지수를 분석하기 위해서는 두 중심성의 상관관계가 먼저 입증되어야 한다.

분석 결과 [표 4-7]을 통해 철도 서비스의 공급 수준과 수요는 강한 양의 상관관계에 있으며, p-value <0.001로 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 현재 우리나라의 대부분 노선 계획이 공급과 수요가 상관관계를 잘 이루고 있음을 의미한다.

[표 4-7] 연도별 지표별 공급/수요중심성 상관관계

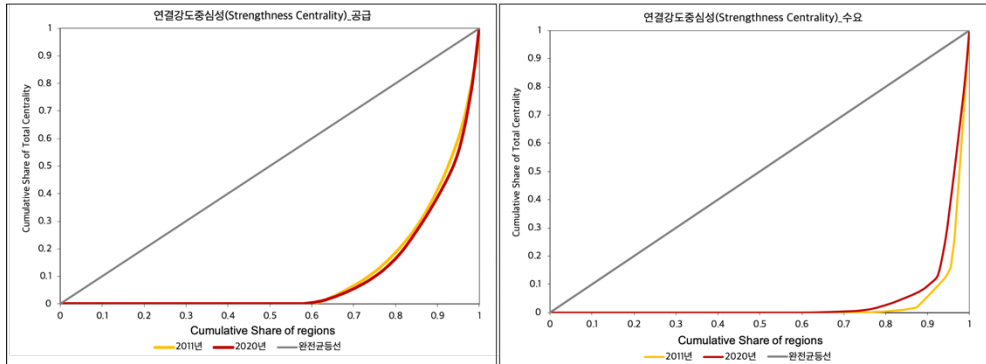
구분		상관계수
연결강도 중심성	2011년	0.8173***
	2020년	0.8103***
매개 중심성	2011년	0.7859***
	2020년	0.8658***
근접 중심성	2011년	0.9264***
	2020년	0.8633***

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

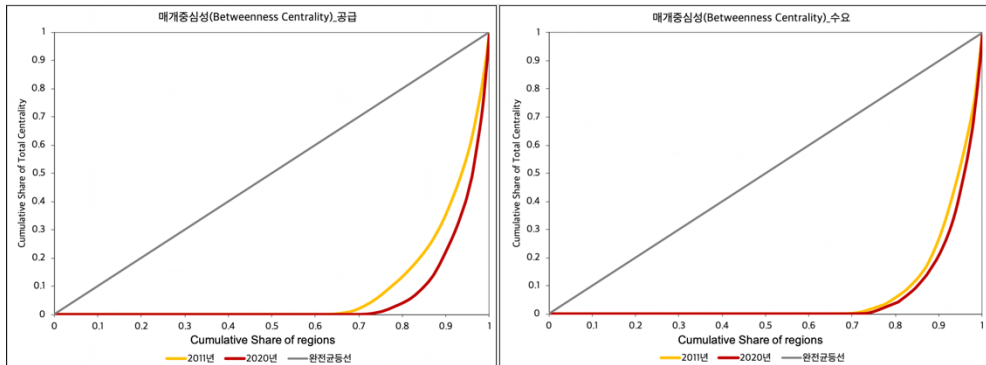
제 2 절 공간적 형평성 변화

본 연구는 비공간 통계량과 공간 통계량을 모두 활용하여 2010년대 지역 간 철도 네트워크의 공간적 형평성을 측정한다. 우선 비공간적 통계치인 지니계수를 통해 약 10년간 철도 네트워크의 공간적 형평성 변화 추이를 살펴본다. 지니 계수로는 중심성이 높고 낮은 지역의 공간적 분포를 알 수 없으므로, LISA분석을 활용하여 중심성의 불평등 정도를 시각화한다.

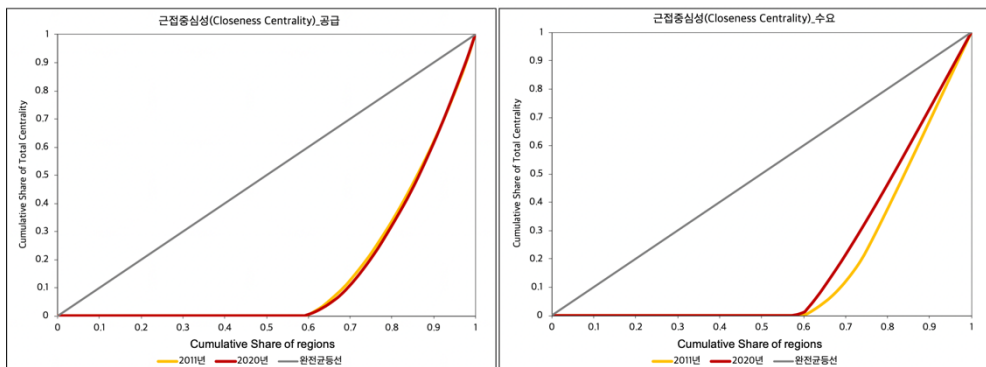
1. 비공간 통계량



[그림 4-7] 연결강도 중심성 로렌즈곡선



[그림 4-8] 매개 중심성 로렌즈곡선



[그림 4-9] 근접 중심성 로렌즈곡선

2011년과 2020년의 중심성 지표별 로렌즈 곡선은 [그림 4-7]~[그림 4-9]와 같다. [표 4-8]를 통해 최근 10년동안 철도 노선의

공급이 증가하였음에도 불구하고 전반적인 지니 계수 값의 변화는 미미하였음을 알 수 있다. 매개 중심성의 경우 2020년 기준 0.8786으로 중심성 지표 중 가장 높은 불평등을 보였다. 전반적으로 철도망이 확장되면서 매개 중심성의 지역 간 불균형이 증가하였으며, 이는 환승 거점의 편중 현상이 심화되고 있음을 의미한다. 반면, 수요 측면에서 근접 중심성의 형평성이 개선되었으며, 철도 공급에 비해 철도 수요는 전국적으로 꾸준히 증가하고 있기 때문으로 판단된다. 실제로 2011년 대비 2019년의 철도 수단 분담률은 약 29% 증가하였다⁹⁾.

[표 4-8] 지표별 연도별 지니계수

구분		2011년	2020년	증감률(%)
연결강도 중심성	공급	0.7800	0.7825	0.3
	수요	0.9370	0.9056	-3.3
매개 중심성	공급	0.8186	0.8786	7.3
	수요	0.8563	0.8787	2.6
근접 중심성	공급	0.6906	0.6983	1.1
	수요	0.6685	0.6197	-7.3

2. 공간 통계량

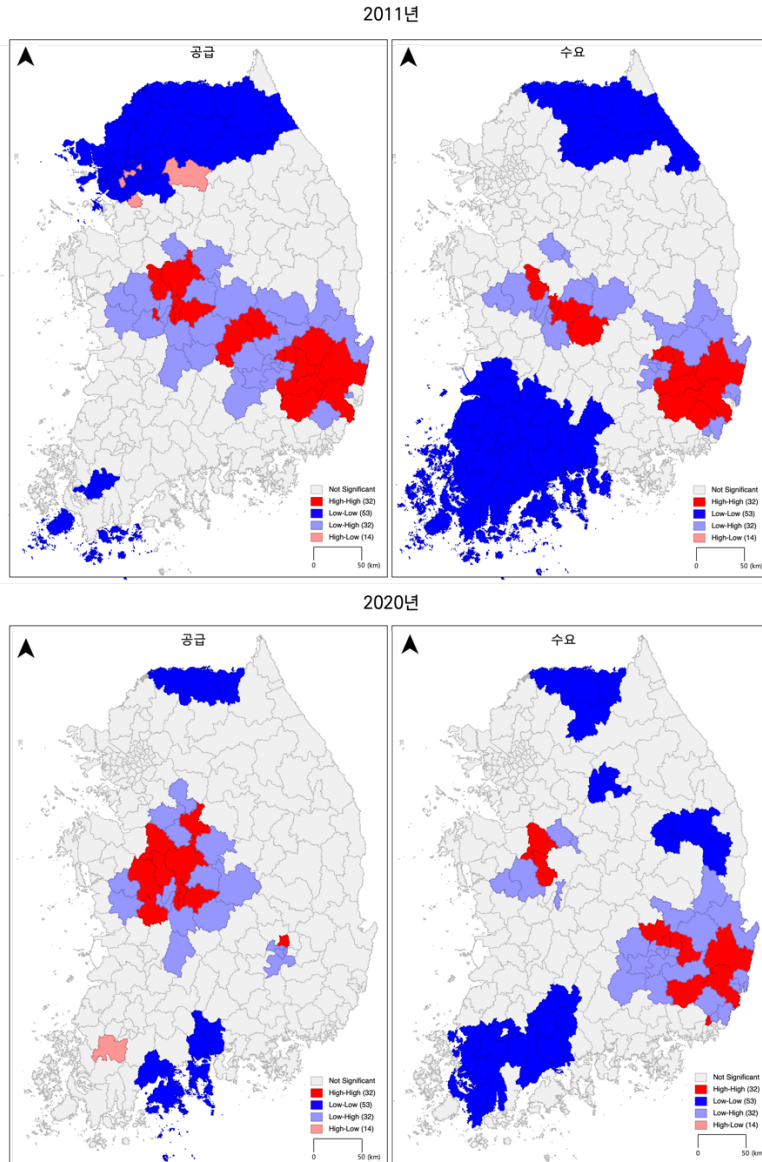
앞서 제시한 1절의 중심성 분석 결과와 지니계수를 통해서는 공간적 불평등의 구체적인 변화를 판단하기에 무리가 있다. 이에 본 연구는 GIS 기반의 공간적 분포 분석 결과를 추가로 제시하였다.

공간적 분포를 알아보기 위해 LISA (Local Indicator of Spatial Association) 분석을 수행하였다. 일변량 국지모란지수를 이용하여 중심성이 높거나 낮은 지역이 지리적으로 어떻게 밀집되어 분포하고 있는지 분석했다. 이어서 두 변수를 활용하는 이변량 국지모란지수를 통해 공급 중심성과 수요 중심성 간의 공간적 상관관계를 시각화하였다. 이 분석에 오픈 소스 소프트웨어 GeoDa가 이용되었다.

⁹⁾ 국토교통부, 「교통부문수송실적보고」, 각 연도.

1) 일변량 LISA 분석(Univariate LISA analysis)

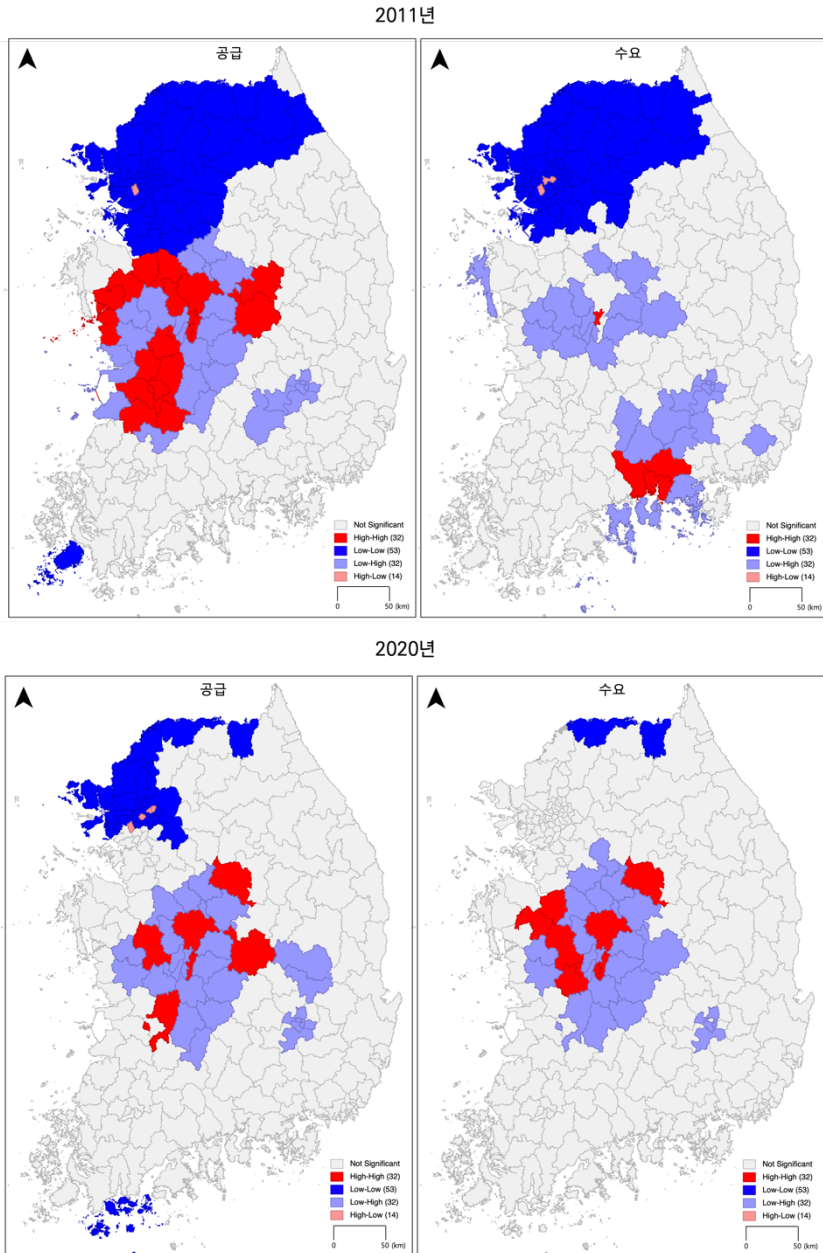
일변량 LISA 분석은 개별 지역의 중심성 값에 대해 해당 지역의 중심성과 인접 지역 중심성의 유사한 정도를 나타내는 지수이다.



[그림 4-10] 연결강도 중심성 일변량 LISA분석의 클러스터 지도

[그림 4-10]은 연결강도 중심성의 공간 집중 정도를 나타낸다.

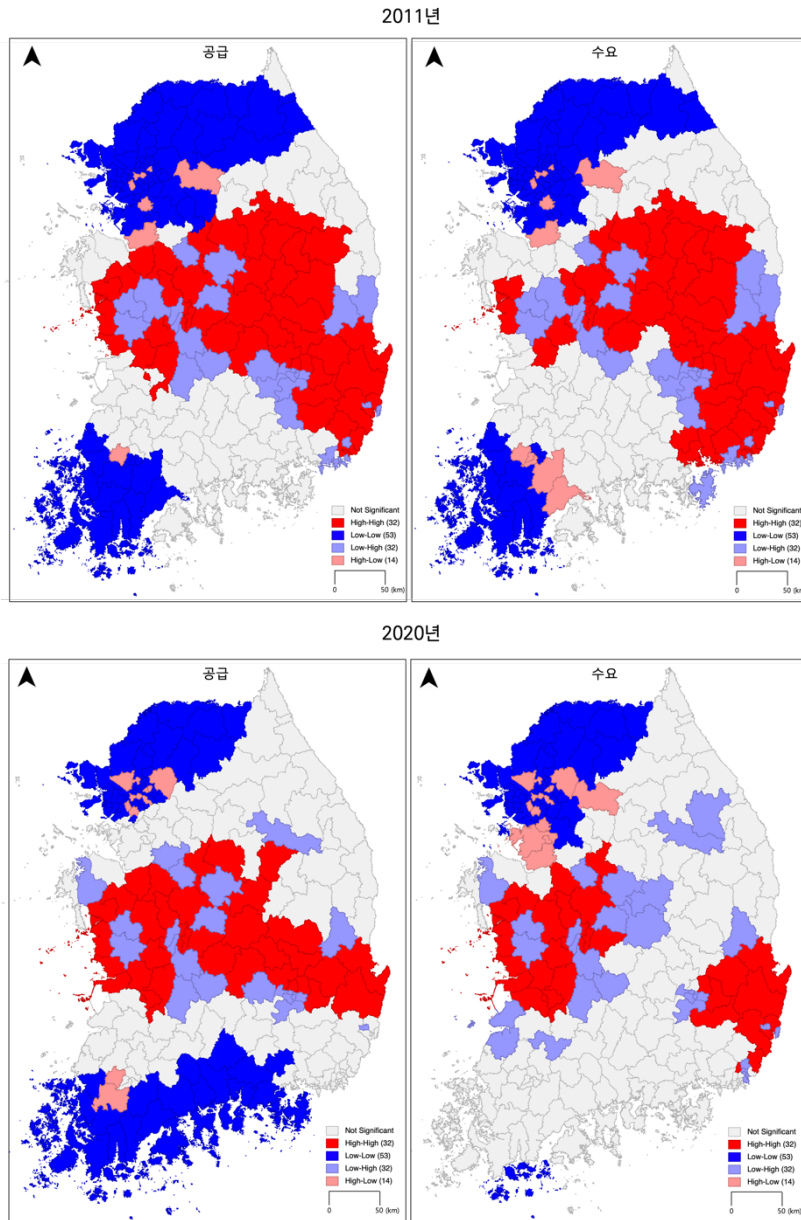
연결강도 중심성은 경부선이 지나는 축 인근 지역, 특히 경상도에 중심성이 높은 지역이 밀집되어 있는 것을 알 수 있다. 반면 전남과 강원도는 콜드스팟이다. 2011년과 2020년의 지리적 분포를 비교했을 때 콜드 스팟의 면적이 매우 감소하였으나, 군집 패턴은 유지되고 있다.



[그림 4-11] 매개 중심성 일변량 LISA분석의 클러스터 지도

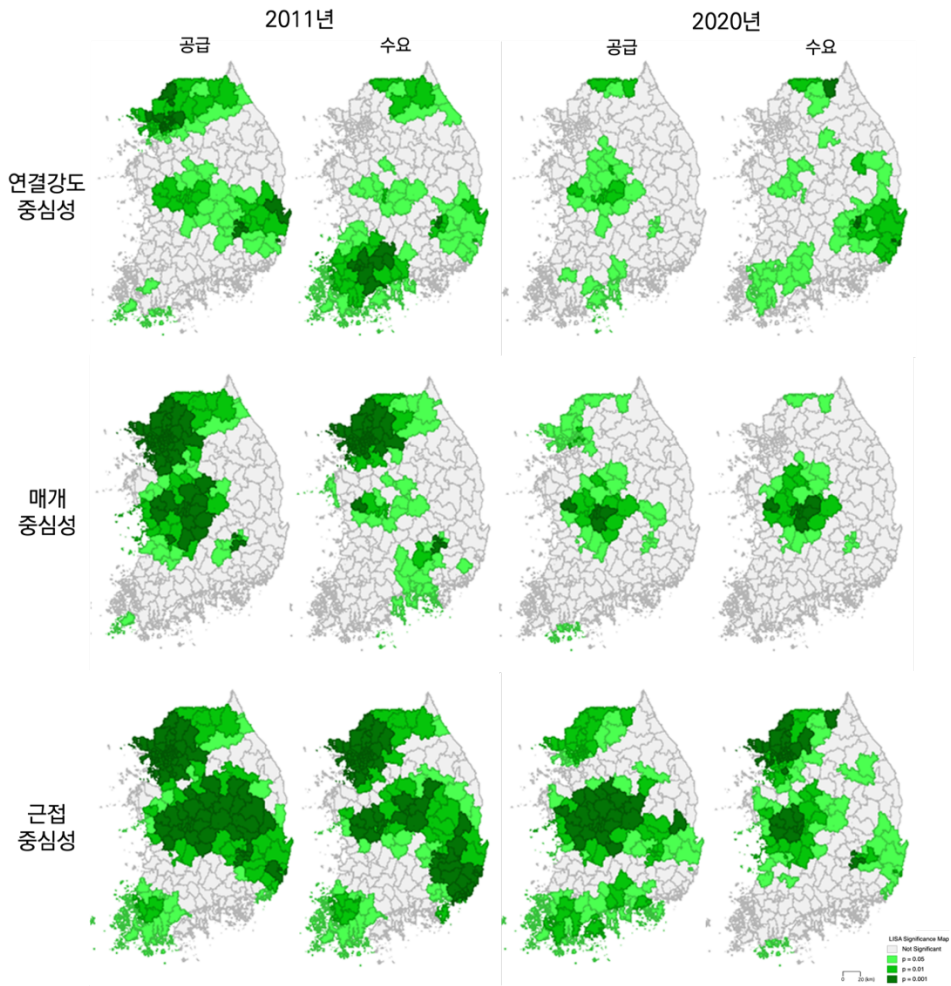
[그림 4-11]은 매개 중심성의 공간적 자기상관 분석 결과이다. 2011년 매개 중심성은 공급과 수요 지표에서 핫스팟이 확연하게 다르게 나타난다. 공급측면에서는 국토 중앙에 있는 충청권에 핫스팟이 나타나지만, 수요는 경상남도 진주 주변에 핫스팟이 형성되어 있다. [표 4-3]의 2011년 매개중심성 순위를 보면 15위권 안에 경상남도 밀양시, 김해시 등 경상남도 지역이 7곳이 포함되어 있기 때문이다. 2011년 당시 경상남도에는 경부고속선을 포함하여 다양한 노선의 지역간 철도 서비스가 공급되었기 때문에 경상남도에서 환승하는 승객들이 많았던 것으로 추정된다.

2020년에는 공급과 수요 측면 모두 충청권에 핫스팟이 형성되었으며, 콜드스팟의 면적도 확연하게 감소하였다. 전체적으로 핫스팟 주변에는 LH군집(low-high)이 몰려 있다. 이는 결국 국지적 범위에서 봤을 때는 대도시 위주로 철도 공급 및 수요가 몰린다는 것을 의미한다.



[그림 4-12] 근접 중심성 일변량 LISA분석의 클러스터 지도

[그림 4-12]는 근접 중심성의 공간 집중 정도를 시각화한 결과이다. 근접 중심성은 핫스팟이 충청권과 경부권으로 넓게 형성되어 있으며, 2020년에 들어서는 경부축 지역의 영향이 감소하고 충청권의 영향력이 조금 더 증가하였다. 경기북부, 강원도와 전라남도 위주로 접근성이 낮은 지역들이 몰려 있는 것으로 나타났다.

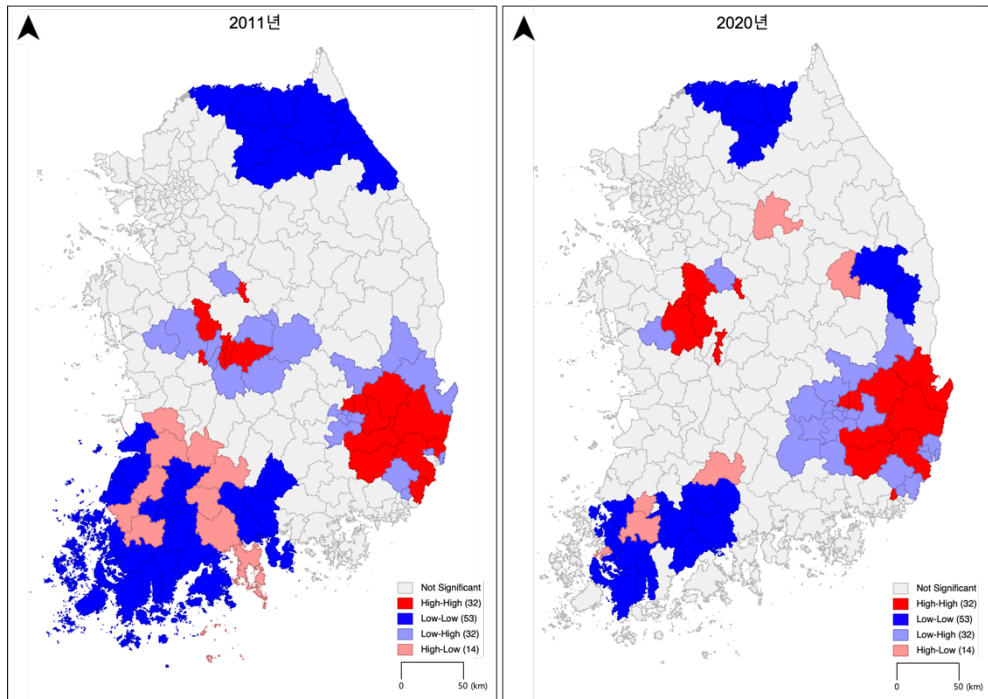


[그림 4-13] 일변량 LISA분석의 유의성 지도

LISA 분석은 0.05% 유의 수준에서 판단한다. 지수값이 도출된 지역들은 모두 [그림 4-13]와 같이 통계적 유의성을 확보하였다. 일변량 국지모란지수 분석 결과, 전반적으로 HH지역으로 분류된 면적이 줄어들거나 넓어지는 변화는 있지만, 기존 지역에 인접해서 변화가 일어나고 있다. 행정구역에 따라 핫 스팟과 콜드 스팟이 확실히 구분되어 나타났다. 핫스팟(high-high)은 경부축이 지나는 지역들에 인접하여 집중되어 있고, 콜드스팟(low-low)은 주로 전라남도, 경기북부와 강원도에 분포하고 있다. 또한, 근접 중심성을 제외하고는 대도시 위주로 핫스팟이 나타나며, 대도시 주변 지역들은 LH군집 형태를 많이 띄었다.

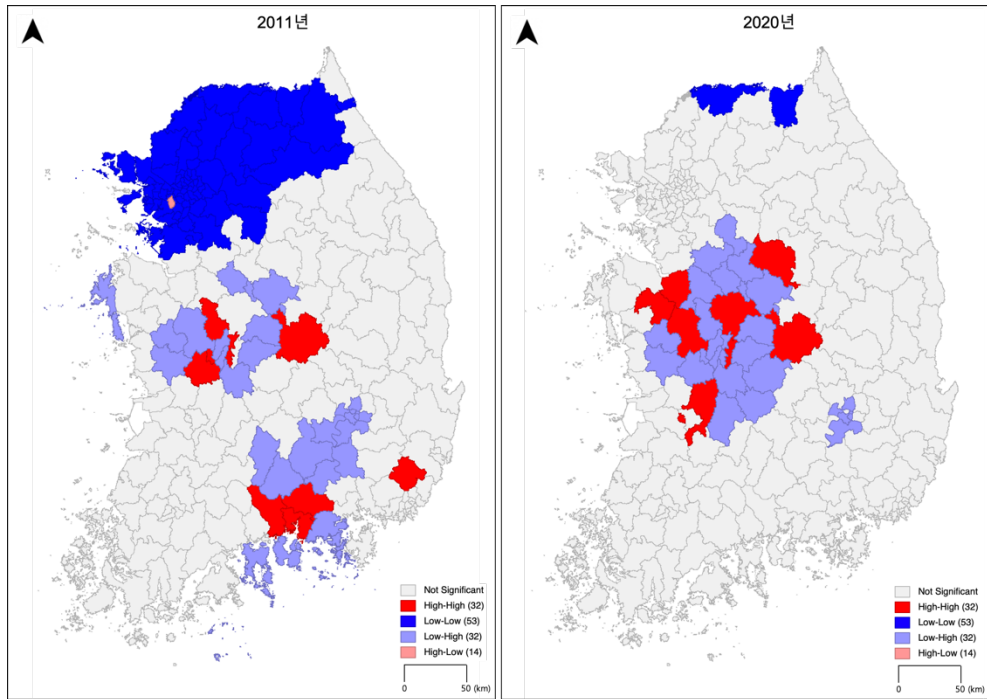
2) 이변량 국지모란지수

이변량 국지모란지수는 공급중심성과 수요중심성 사이의 공간 자기상관을 나타내는 지수이다. HH군집과 LL군집은 각각 공급 수준과 수요가 모두 높거나 낮은 지역임을 의미한다. HL군집은 공급 중심성은 높지만 수요 중심성은 낮은 지역의 군집을 의미하고, LH군집은 공급 중심성은 낮지만 수요 중심성은 높은 경우를 말한다.



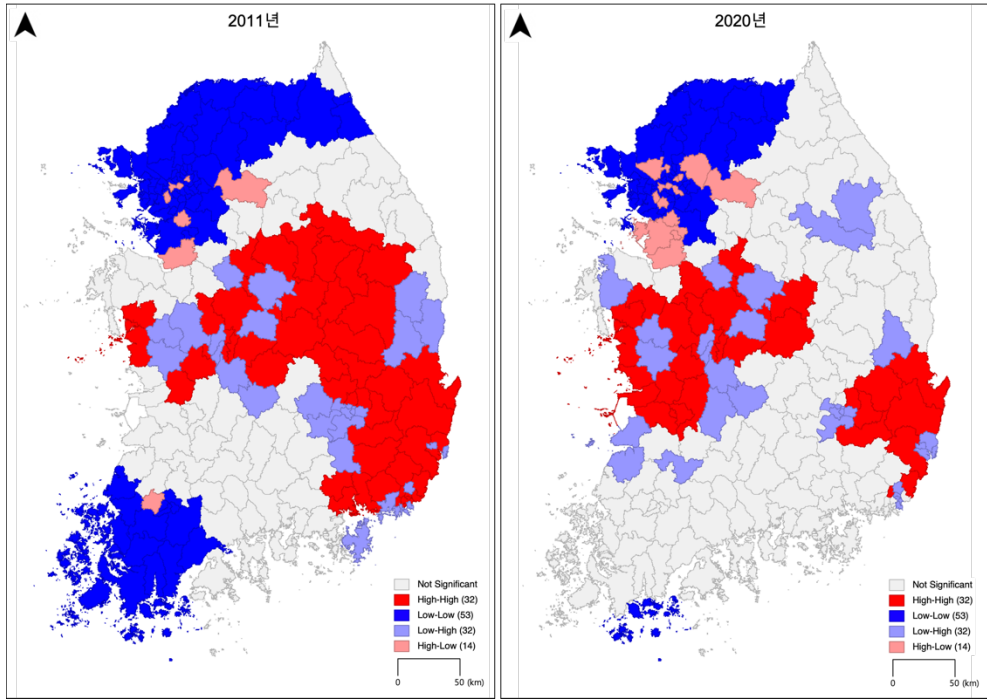
[그림 4-14] 연결강도 중심성 이변량 LISA분석의 클러스터 지도

연결강도 중심성 분석 결과 일변량 국지모란지수와 핫스팟에서는 유사한 결과가 나타났다. [그림 4-14]를 통해 경북권과 충청도 일부 지역은 연결강도 공급중심성과 수요중심성 모두 높은 것을 알 수 있다. 전남권의 경우 일부 지역에서 HL군집이 나타났다. 전라남도는 지역 간 철도의 공급 수준과 수요 모두 낮은 편에 속하지만, 공급에 비해 수요는 더욱 낮은 것으로 분석되었다.



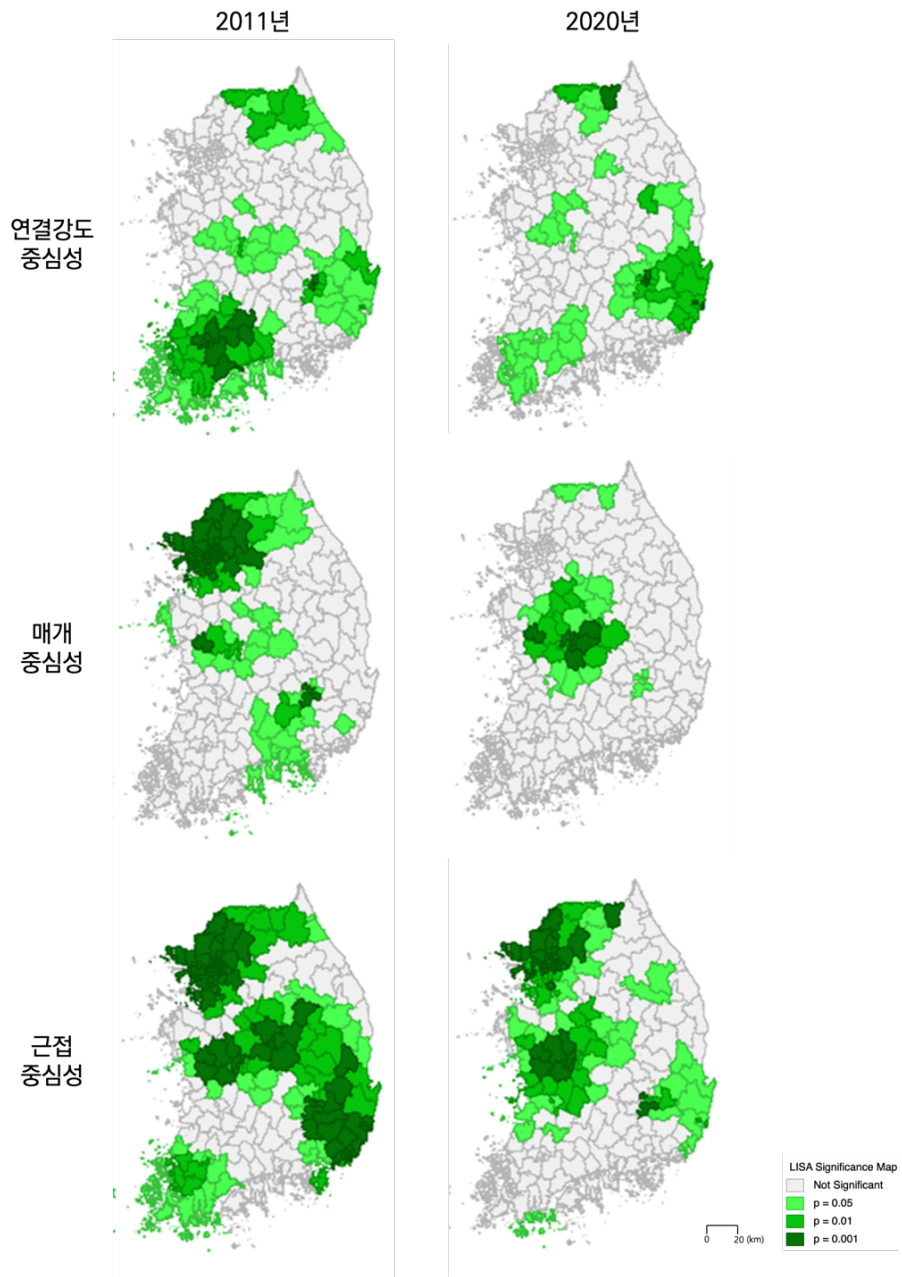
[그림 4-15] 매개 중심성 이변량 LISA분석의 클러스터 지도

[그림 4-15]는 매개 중심성의 이변량 LISA분석 결과를 나타낸 것이다. 2011년 1축에서 2020년 다축의 철도망이 형성되면서 충청권으로 핫스팟이 집중되는 것으로 분석되었다. 대구광역시는 철도 공급수준이 높음에도 불구하고(표 [4-4] 참조), 여전히 공급수준보다 수요가 상대적으로 더 높은 것으로 나타났다.



[그림 4-16] 근접 중심성 이변량 LISA분석의 클러스터 지도

[그림 4-16]는 근접 중심성의 이변량 분석 결과를 나타낸 것이다. 근접중심성 결과를 포함하여 세 개의 중심성 지표 모두 일변량과 이변량 LISA분석의 분포가 유사한 것으로 나타났다. 이를 통해 우리나라는 공급수준과 수요는 대체적으로 유사하게 형성되어 있음을 알 수 있다. 다만, 공간적 형평성 분석 결과 여전히 경부축 주변의 중심성이 높으며, 지역 간 철도 서비스가 불균형하게 공급되고 있음을 알 수 있다.



[그림 4-17] 이변량 LISA분석의 유의성 지도

제 3 절 소결

본 연구는 노드 중심성을 분석하여 각 지역의 연결성, 매개성, 이동성을 평가하였다. 그리고 지니계수와 LISA분석을 활용하여 중심성 지표별로 공간적 형평성이 최근 10년동안 어떻게 변화하였는지를 분석하고, 이를 공간적으로 시각화하였다.

2011년과 2020년 모두 연결강도 중심성, 매개 중심성은 지니계수가 0.8전후의 값으로 도출되었고, 근접 중심성은 0.6정도로 나타났다. 2010년대에 들어서면서 다양한 철도노선이 공급되었지만 공간적 형평성 차원에서의 변화는 미미하였다. 이를 통해 우리나라 지역 간 철도망의 공급 수준 및 수요는 대체적으로 불균형하다고 해석할 수 있다.

사분면 분석과 LISA분석을 통해 개별 지역의 중심성을 살펴본 결과, 중심성이 높은 지역과 낮은 지역이 확연하게 구분되어 있는 것을 알 수 있었다. 경부축이 지나는 충청권과 경북권의 중심성이 높게 도출되었다. 반면, 전라남도과 경기북부, 강원도에 위치하는 대부분의 지역들이 중심성이 낮게 도출되었다. 특히 2020년 기준으로 전라남도의 경우 이동성 측면에서 수요에 비해 공급수준이 매우 낮기 때문에 우선투자가 필요한 지역으로 식별되었다.

공급중심성과 수요중심성은 강한 양의 상관관계를 보이며, 이변량 국지모란지수 결과와 일변량 국지모란지수 결과가 유사한 것으로 보아 공급 수준이 높은 지역은 대체로 수요 또한 높은 것으로 판단할 수 있다.

제 5 장 결 론

철도는 오랜 기간동안 효율성 중심으로 공급되어 왔으며, 그 결과 철도 서비스의 공급 및 수요의 공간적 불균형을 초래했다. 그러나 최근 지역균형발전의 일환으로 철도의 역할 및 투자의 중요성이 확대되고 있다. 이에 본 연구는 국가교통망의 근간인 지역 간 철도를 대상으로 철도 공급수준 및 수요 측면에서 공간적 형평성을 분석하고 최근 약 10년동안의 변화를 파악하였다.

철도망의 특성을 분석하기 위해 네트워크 분석 방법론 중 하나인 노드 중심성을 활용하였으며, 연결강도, 매개, 근접 중심성 세 가지의 지표를 활용하였다. 각각의 지표는 연결성(connectivity), 매개성(transit-point), 그리고 이동성(mobility)을 나타낸다. 노드 중심성은 교통체계의 구조적 특성에 초점을 맞춘다. 또한, 본 연구는 운행빈도와 구간별 재차인원을 링크 가중치로 설정하여 철도망 평가의 현실성을 높였다.

본 연구는 노드 중심성 분석 결과를 바탕으로 공간적 형평성을 평가하였다. 첫째, 지니계수와 로렌츠곡선을 활용하여 약 10년 간의 형평성 변화 추이를 살펴보았다. 그러나 지니계수로는 지역별로 중심성이 어떻게 변화했는지, 또는 공급 중심성과 수요 중심성의 격차가 많이 나는 지역이 어디인지 파악할 수 없다. 이를 보완하기 위해 GIS 기반의 국지모란지수를 활용하여 공간 집중정도를 분석했다.

중심성 분석 결과 연결강도 중심성은 2011년에는 공급, 수요 측면 모두에서 대구광역시가 가장 높았으나, 2020년에는 공급측면에서는 서울특별시와 광명시, 즉 수도권이 가장 높았다. 그러나 수요 측면에서는 여전히 대구광역시의 중요도가 가장 높았다. 이는 최근 10년간 다양한 노선이 생기면서 물리적으로는 경부선의 영향이 감소했지만, 여전히 경북권의 이용객들이 인접 지역 간을 통행할 때 철도를 가장 많이 이용하는 것으로 나타났다. 매개 중심성 또한 경부선이 지나가는 지역이 높은 순위를 차지했다. 근접 중심성은 통상적으로 지리적으로 중심에 있는 노드의 중요도가 높으므로 충청권의 중심성이 높게 도출되었다.

국지적 모란지수를 분석한 결과 또한 2011년과 2020년 모두

경북권과 충청권의 철도 서비스 수준이 여전히 다른 지역에 비해 매우 높은 것으로 드러났다. 특히 환승 허브를 식별하는 매개중심성을 분석한 결과 최근 10년동안 충청권의 영향력이 더욱 증가하였음을 알 수 있었다. 환승 허브는 네트워크 내에서 통제력이 강한 노드를 의미한다. 따라서 특정 노드의 매개성이 강해지면 해당 지역에 위험이 발생했을 때 전체 네트워크에 문제가 발생할 수 있다. 반면, 전남권과 강원권의 철도 서비스 수준과 수요가 낮은 것으로 나타났다. 특히 전남권은 수요에 비해 공급수준이 낮기 때문에 철도 서비스의 실질적인 공급 수준이 개선될 필요가 있다.

본 연구는 최근 10년간 지역 간 철도망의 공급수준과 수요가 공간적 형평성 차원에서 어떻게 변화하였는지 분석하였다. 그러나 몇 가지 한계점이 존재한다. 첫째, 지역 간 이동에 초점을 맞추기 위해 분석 범위를 고속/일반 철도로 한정하였으므로 광역/도시철도를 포함할 경우 연구 결과가 달라질 수 있다. 특히 수도권은 경우 광역/도시철도가 발달하였으므로 광역권 내 지역 간 격차가 줄어들 것으로 예상된다. 또한, 지역 내의 인구밀도, 토지특성 등이 다르기 때문에 지역균형발전을 위해서는 실제로 보완적 타수단 등이 고려될 수 있다. 그럼에도 불구하고 철도는 지역균형발전을 위한 주요 수단으로 인정받고 있으므로 본 연구 또한 지역균형발전을 위한 교통체계수립에 활용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- 국토교통부. (2020). 철도통계연보. 세종
- 김경태, & 송재민. (2017). 평균경로시간 변화를 활용한 서울시 도로 네트워크 강건성 분석. *서울도시연구*, 18(2), 81-93.
- 김규식. (2015). 공공보육서비스 이용 기회의 공간적 형평성 평가에 관한 연구: 서울시 국공립어린이집을 대상으로 서울대학교 대학원.
- 김수현, 우태성, & 노종호. (2020). 지역 형평성 기반의 국가철도망 구축 및 운영전략. *한국교통연구원 기본연구보고서*, 1-219.
- 송예나, 이금숙, & 장한울. (2019). 서울시 지하철 네트워크의 접근성과 공간적 형평성. *한국경제지리학회지*, 22(4), 513-525.
- 윤영원, & 장수은. (2014). 통행발생 행태분석을 통한 사회적 배제수준 분석. *대한교통학회 학술대회지*, 162-167.
- 이준호. (2020). 서울시 대중교통 서비스의 일반인과 취약계층 간 형평성 평가 서울대학교 대학원.
- 정동재, 이상준, 장수은, & 신성일. (2020). 한국 철도망 확장과 접근성의 변화: 효율성과 형평성 관점의 분석. *한국철도학회 논문집*, 23(2), 109-119.
- 홍성표, 이창효, & 이승일. (2015). 수도권전철 역별 네트워크 중심성에 따른 역세권 토지이용패턴 분석 연구. *국토계획*, 50(4), p209-226.
- Barrat, A., Barthelemy, M., Pastor-Satorras, R., & Vespignani, A. (2004). The architecture of complex weighted networks. *Proceedings of the national academy of sciences*, 101(11), 3747-3752.
- Bohman, H., & Nilsson, D. (2021). Borrowed sizes. *Journal of Transport and Land Use*, 14(1), 87-103.
- Brandes, U. (2005). *Network analysis: methodological foundations* (Vol. 3418). Springer Science & Business Media.
- Cao, W., Feng, X., Jia, J., & Zhang, H. (2019). Characterizing the structure of the railway network in China: a complex

- weighted network approach. *Journal of Advanced Transportation*, 2019.
- Casali, Y., & Heinimann, H. R. (2019). A topological characterization of flooding impacts on the Zurich road network. *PLoS One*, 14(7), e0220338.
- Cats, O. (2017). Topological evolution of a metropolitan rail transport network: The case of Stockholm. *Journal of Transport Geography*, 62, 172–183.
- Chakrabarti, S., Kushari, T., & Mazumder, T. (2022). Does transportation network centrality determine housing price? *Journal of Transport Geography*, 103, 103397.
- Chang, J. S., & Kim, S. (2022). Node centrality of North Korean Railways. *Transportation Planning and Technology*, 1–15.
- Chen, C., D'Alfonso, T., Guo, H., & Jiang, C. (2018). Graph theoretical analysis of the Chinese high-speed rail network over time. *Research in Transportation Economics*, 72, 3–14.
- Chen, Z., & Haynes, K. E. (2017). Impact of high-speed rail on regional economic disparity in China. *Journal of Transport Geography*, 65, 80–91.
- Chen, Z., & Haynes, K. E. (2017). Impact of high-speed rail on regional economic disparity in China. *Journal of Transport Geography*, 65, 80–91.
- Démurger, S. (2001). Infrastructure development and economic growth: an explanation for regional disparities in China? *Journal of Comparative economics*, 29(1), 95–117.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1), 269–271.
- Dobruszkes, F., Chen, C.-L., Moyano, A., Pagliara, F., & Endemann, P. (2022). Is high-speed rail socially exclusive? An evidence-based worldwide analysis. *Travel Behaviour and Society*, 26, 96–107.
- Freeman, L. C. (1977). A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, 35–41.

- Freeman, L. C. (1978). Centrality in social networks conceptual clarification. *Social networks*, 1(3), 215–239.
- Jiao, J., Wang, J., & Jin, F. (2017). Impacts of high-speed rail lines on the city network in China. *Journal of Transport Geography*, 60, 257–266.
- Jiao, J., Wang, J., Jin, F., & Dunford, M. (2014). Impacts on accessibility of China's present and future HSR network. *Journal of Transport Geography*, 40, 123–132.
- Kim, H., & Sultana, S. (2015). The impacts of high-speed rail extensions on accessibility and spatial equity changes in South Korea from 2004 to 2018. *Journal of Transport Geography*, 45, 48–61.
- Kitsak, M., Gallos, L. K., Havlin, S., Liljeros, F., Muchnik, L., Stanley, H. E., & Makse, H. A. (2010). Identification of influential spreaders in complex networks. *Nature physics*, 6(11), 888–893.
- Lee, J. W., & Lee, K. W. (2017). Analysis of Seoul Metropolitan Subway Network Characteristics Using Network Centrality Measures. *Journal of the Korean Society for Railway*, 20(3), 413–422.
- Levinson, D. (2010). Equity Effects of Road Pricing: A Review. *Transport reviews*, 30(1), 33–57.
- Lin, J., & Ban, Y. (2013). Complex network topology of transportation systems. *Transport reviews*, 33(6), 658–685.
- Liu, S., Wan, Y., & Zhang, A. (2020). Does China's high-speed rail development lead to regional disparities? A network perspective. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 138, 299–321.
- Liu, X., Dai, L., & Derudder, B. (2017). Spatial Inequality in the Southeast Asian Intercity Transport Network. *Geographical Review*, 107(2), 317–335
- Moran, P. A. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 37(1/2), 17–23.

- Newman, M. E. (2001). Scientific collaboration networks. II. Shortest paths, weighted networks, and centrality. *Physical review E*, 64(1), 016132.
- Opsahl, T., Agneessens, F., & Skvoretz, J. (2010). Node centrality in weighted networks: Generalizing degree and shortest paths. *Social networks*, 32(3), 245-251.
- Park, C., & Chang, J. S. (2020). Spatial equity of excess commuting by transit in Seoul. *Transportation Planning and Technology*, 43(1), 101-112.
- Radil, S. M. (2011). *Spatializing social networks: making space for theory in spatial analysis*. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Ren, X., Chen, Z., Wang, F., Dan, T., Wang, W., Guo, X., & Liu, C. (2020). Impact of high-speed rail on social equity in China: Evidence from a mode choice survey. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 138, 422-441.
- Soh, H., Lim, S., Zhang, T., Fu, X., Lee, G. K. K., Hung, T. G. G., Di, P., Prakasam, S., & Wong, L. (2010). Weighted complex network analysis of travel routes on the Singapore public transportation system. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(24), 5852-5863.
- Song, Y., Kim, H., Lee, K., & Ahn, K. (2018). Subway network expansion and transit equity: A case study of Gwangju metropolitan area, South Korea. *Transport Policy*, 72, 148-158.
- Sun, Q., Guo, X., Jiang, W., Ding, H., Li, T., & Xu, X. (2019). Exploring the Node Importance and Its Influencing Factors in the Railway Freight Transportation Network in China. *Journal of Advanced Transportation*, 2019, 1-16.
- Theil, H. (1967). *Economics and information theory*.
- Viegas, J. M. (2001). Making urban road pricing acceptable and effective: searching for quality and equity in urban mobility. *Transport Policy*, 8(4), 289-294.

- Wang, J., Mo, H., Wang, F., & Jin, F. (2011). Exploring the network structure and nodal centrality of China's air transport network: A complex network approach. *Journal of Transport Geography*, 19(4), 712-721.
- Wei, S., Teng, S. N., Li, H. J., Xu, J., Ma, H., Luan, X. L., Yang, X., Shen, D., Liu, M., Huang, Z. Y. X., & Xu, C. (2019). Hierarchical structure in the world's largest high-speed rail network. *PLoS One*, 14(2), e0211052.
- Wen, T., Gao, Q., Chen, Y.-w., & Cheong, K. H. (2022). Exploring the vulnerability of transportation networks by entropy: A case study of Asia-Europe maritime transportation network. *Reliability Engineering & System Safety*, 108578.
- Zhai, J., Wu, W., Yun, Y., Jia, B., Sun, Y., & Wang, Q. (2021). Travel satisfaction and rail accessibility. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 100, 103052.
- Zhang, F., Yang, Z., Jiao, J., Liu, W., & Wu, W. (2020). The effects of high-speed rail development on regional equity in China. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 141, 180-202.
- Zhang, F., Yang, Z., Jiao, J., Liu, W., & Wu, W. (2020). The effects of high-speed rail development on regional equity in China. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 141, 180-202.

부록

부록 1. [표] 2011년 근접중심성 제2사분면 노드

노드	공급수준(x좌표)	수요(y좌표)
경기도 수원시	-0.207073012	0.996067666
경기도 양평군	-0.238444198	0.805290556
경상남도 사천시	-0.268901659	0.389245149
경상남도 진주시	-0.16098448	0.556667684
경상남도 하동군	-0.362038672	0.251408501
경상남도 함안군	-0.034955425	0.749109229
경상북도 봉화군	-0.141419912	0.225236407
부산광역시 기장군	-0.059499822	0.964349306
부산광역시 동구	-0.053413075	0.999383714
부산광역시 동래구	-0.434514109	0.896344122
부산광역시 부산진구	-0.230688651	0.958025449
부산광역시 북구	-0.013039588	0.993963223
부산광역시 사상구	-0.193722172	0.996233258
부산광역시 수영구	-0.487961944	0.894727414
부산광역시 연제구	-0.428146777	0.924048648
부산광역시 해운대구	-0.283800129	0.930218399
서울특별시 동대문구	-0.451287051	0.743450896
서울특별시 영등포구	-0.273891865	0.997692014
서울특별시 용산구	-0.107046561	0.999320287
울산광역시 남구	-0.077566322	0.962136946
전라남도 광양시	-0.434514109	0.133349811
전라남도 순천시	-0.459562688	0.031448212
전라북도 군산시	-0.059499822	0.927421947
전라북도 김제시	-0.041141142	0.013033194
전라북도 완주군	-0.02873618	0.183798829
충청남도 서천군	-0.062531006	0.94241307

부록 2. [표] 2020년 근접중심성 제2사분면 노드

노드	공급수준(x좌표)	수요(y좌표)
강원도 강릉시	-0.21038	0.83625
강원도 동해시	-0.30762	0.810683
강원도 평창군	-0.14103	0.861954
강원도 횡성군	-0.01872	0.887764
경기도 남양주시	-0.2783	0.755773
경기도 오산시	-0.26799	0.988091
경상남도 김해시	-0.08919	0.960302
경상남도 사천시	-0.68742	0.593025
경상남도 양산시	-0.04529	0.979446
경상남도 진주시	-0.56006	0.887643
경상남도 창원시	-0.51539	0.923871
경상남도 하동군	-0.77517	0.38271
경상남도 함안군	-0.62106	0.611838
경상북도 군위군	-0.19846	0.607042
경상북도 안동시	-0.38043	0.314387
경상북도 영주시	-0.28526	0.300511
경상북도 의성군	-0.53495	0.444355
경상북도 칠곡군	-0.08484	0.969057
광주광역시 북구	-0.1545	0.659757
부산광역시 기장군	-0.22345	0.796377
부산광역시 부산진구	-0.34381	0.64713
부산광역시 사상구	-0.0529	0.974251
부산광역시 해운대구	-0.51923	0.629644
울산광역시 남구	-0.63203	0.794211
울산광역시 북구	-0.61936	0.794778
전라남도 곡성군	-0.54227	0.885398
전라남도 광양시	-0.82244	0.577013
전라남도 나주시	-0.43607	0.828123
전라남도 목포시	-0.49495	0.758042
전라남도 무안군	-0.70149	0.588609
전라남도 순천시	-0.76509	0.865535
전라남도 여수시	-0.93508	0.844824

전라남도 함평군	-0.61021	0.646381
전라북도 남원시	-0.13717	0.905222
전라북도 임실군	-0.0333	0.722542
충청남도 보령시	-0.1275	0.41584
충청남도 서천군	-0.17537	0.53685
충청북도 단양군	-0.39931	0.441351

Abstract

Changes in spatial equity of the Korean intercity rail network in the 2010s

Sunhwa Kim

Department of Environmental Planning
Graduate School of Environmental Studies
Seoul National University

Korea has supplied railway networks mainly to the Gyeongbu axis for a long time. Cost-efficiency was the predominant rationale for the supply. However, the governmental policy of rail supply has changed to support balanced regional developments. In order to build a railway network based on regional equity, the supply level of the current system should be assessed. Although there are many studies that have dealt with economic changes before and after the opening of high-speed rail, few studies have explored equity changes over the past 10 years. In addition, previous studies mainly measured spatial equity based on socio-economic factors such as land use and population. Since there is an interaction between the structure of the railway network and the travel patterns of people, this study focuses on the characteristics of the transportation system, which is the fundamental cause of regional imbalance.

Thus, this research assesses the supply and demand of the current state of rail service for each region using the network analysis. The extent of the inequality was analyzed spatially. A node centrality analysis as one of the methodologies of network analysis was used to reflect the properties of the transportation system. For the centrality

index, the strength centrality, betweenness centrality, and closeness centrality, and each index represents connectivity, transferability, and mobility, respectively. The change in spatial equality was analyzed based on the centrality value derived for each region. For this purpose, non-spatial statistics and spatial statistics were both used. The changes in rail service unbalance in South Korea over 10 years were identified through the Gini coefficient, and the spatial distribution was observed based on spatial autocorrelation. The Local Moran's I index was used as the spatial autocorrelation analysis. The concentrated extent of supply and demand of regions were analyzed. Also, the correlation between supply and demand was determined through the bivariate Moran index.

The following summarizes the main results of this paper. First, Gini coefficient analysis results shows that the degree centrality and betweenness centrality values were both 0.8 before and after, and the closeness centrality was about 0.6. It could be identified from the Gini coefficient being between 0 and 1 that the railway service levels of regions were unbalanced in South Korea. Despite the expansion of the rail infrastructure during the past 10 years, the spatial balance had not improved. This also proves that the improvement in spatial balance is not easy only through physical railroad line supply. Secondly, the Moran index analysis shows that the supply level and demand of railway service remains significantly higher in the Gyeongbuk and Chungcheong regions than in other regions in 2011 and 2020. In particular, the betweenness centrality analysis that identifies the transfer hubs shows that the impact of the Chungcheong region had increased over the past 10 years. Transfer hubs refer to nodes with significant control within transportation networks. Therefore, a node which has higher betweenness centrality value could incur problems for the entire network when the corresponding region falls under danger. On the contrary, the railway supply state and demand of the north of Gyeonggi-do, Jeollanam-do, and some areas of Gangwon-do were low.

The results of this study can be used during investment decision-making for the balanced development of regions in the future. In particular, regions with low supply levels relative to the demand can be sorted as investment-priority regions. However, the impact of the Seoul metropolitan region could have been underestimated due to the elimination of the metro from the scope of analysis. Additionally, a complementary method must be considered for the actual balanced development of regions because the land properties within each region differ.

Keywords : network analysis, spatial equity, node centrality, Gini coefficient, spatial autocorrelation

Student Number : 2021-29161