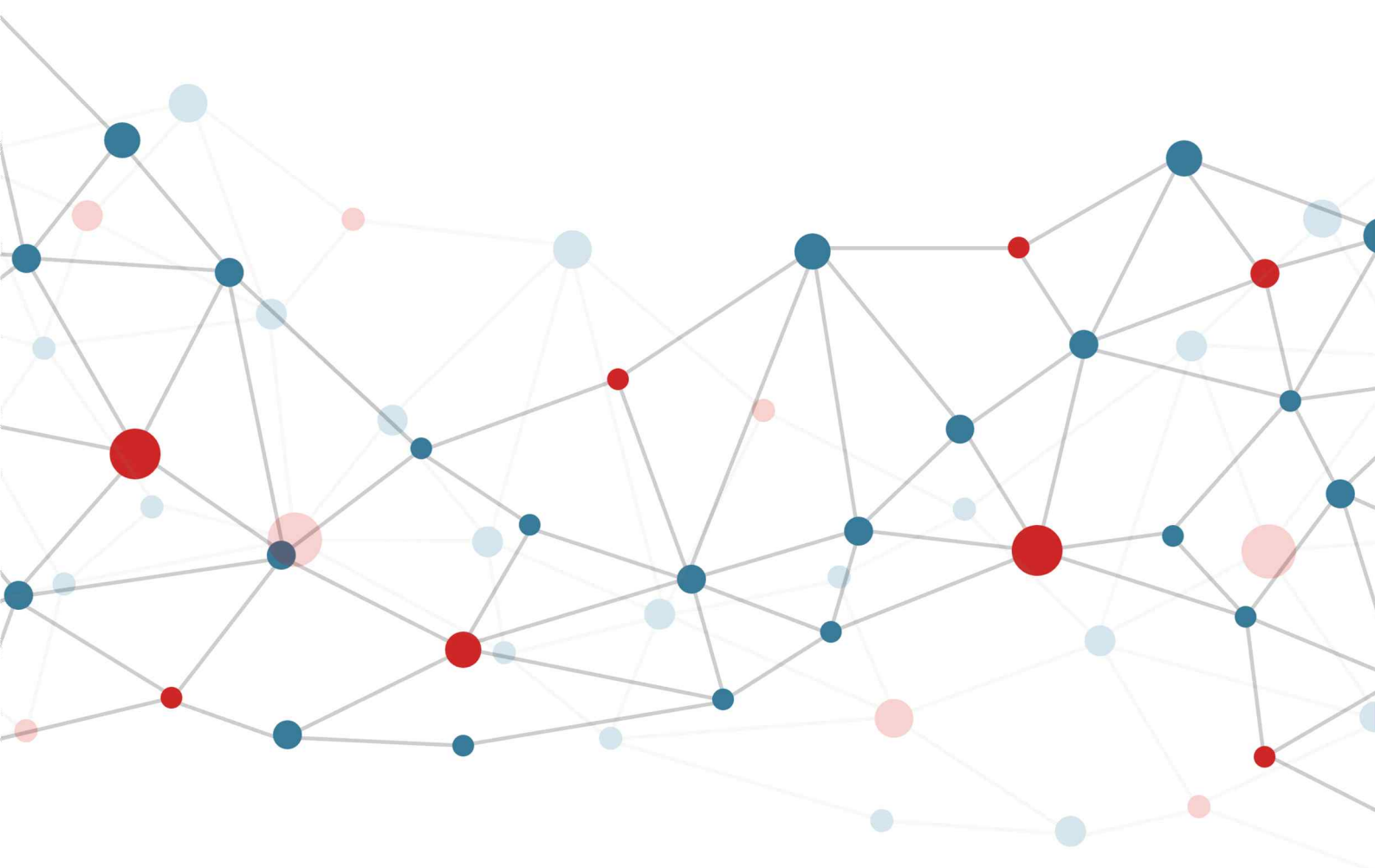


위성영상과 네트워크 이론을 활용한 북한 도로교통체계 연구



서울대학교 통일평화연구원
The Institute for Peace and Unification Studies
Seoul National University

위성영상과 네트워크 이론을 활용한 북한 도로교통체계 연구

서울대학교 통일·평화연구원

제 출 문

서울대학교 통일평화연구원장 귀하

본 보고서를 2024년 서울대학교 통일·평화기반구축사업 「위성영상과 네트워크 이론을 활용한 북한 도로교통체계 연구」 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2025. 02. 15.

서울대학교 환경대학원 환경계획학과 교수 장수은

참여 연구진

장수은	서울대학교 환경계획학과 교통학전공	교수
정송희	서울대학교 환경계획학과 교통학전공	석사과정
이예영	서울대학교 환경계획학과 교통학전공	석사과정

이 보고서는 서울대학교 통일·평화연구원에서 운영하는
2024년 서울대학교 통일·평화기반구축사업의 지원을 받아 수행한 연구의 결과물임.

요약

북한의 철도 중심 교통체계가 약화하고 도로 중심의 교통체계가 성장하고 있는 상황에서, 기존에 제안된 통일 한반도 교통망 구상의 재검토가 필요한 실정이다. 이에 본 연구는 접근 가능한 문헌정보, 공간정보, 위성영상정보를 활용하여 북한 도로교통 네트워크 데이터베이스를 구축하고, 네트워크 이론을 적용하여 그 특성을 분석하였다.

북한 도로 네트워크 데이터베이스 구축

교통분석용 북한 도로 네트워크 구축 과정은 크게 GIS DB 구축과 교통분석용 네트워크 구축으로 구분되며 각각 네 가지 쟁점이 도출되었다. 먼저, GIS DB 구축은 북한 지역 간선도로의 공간정보를 DB화하는 것으로, 이 단계에서는 구축 대상 구간 선정, 수치지도 선형 정리, 시종점 특정, 현행화가 쟁점으로 도출되었다. 이를 해결하기 위하여 도로리정도와 위성영상 자료를 이용하여 수치지도의 공간정보를 편집하였다. 교통분석용 네트워크 구축은 단순 공간정보를 교통분석에 활용할 수 있는 네트워크 정보로 변환하는 것으로, 이 단계에서도 노드 생성 및 링크 분할, 네트워크 연결성 확보, 교차부 단순화, 속성정보 입력의 네 가지 쟁점을 확인하였다. 네트워크 분석 시 발생할 수 있는 왜곡 및 정보 부족 문제를 해소 또는 완화하는 방향으로 각 쟁점에 따른 대안을 제시하였다.

네트워크 이론 기반 북한 도로교통체계 분석

북한 도로교통 공급체계에 관한 네트워크 분석 결과, 북한의 도로 네트워크는 6개의 주요 교통권역으로 구분되며, 권역 내, 권역 간, 전역 네트워크의 연계성 측면에서 중요한 지점이 서로 다른 것으로 나타났다. 먼저, 평양직할시는 전역 연계성, 권역 내 및 권역 간 연계성 지수에서 모두 상위권을 기록한 노드들이 집중되어 있어 북한 도로 네트워크의 핵심 허브로 기능하고 있다. 이는 다른 여러 나라에서 관찰되듯 수도가 한 나라에서 수행하는 사회경제적 역할을 보여줌과 동시에 체제를 통제·관리하고자 하는 북한 사회의 특수한 정치적 의도가 반영된 결과로 풀이된다. 둘째, 북부 국경축과 평양을 연결하는 희천-강계 간 1급 도로, 동서 연결축과 동해안축을 연결하는 북창-금야 간 2급 도로 등 권역 간 연계성을 지원하는 주요 결절점들이 고속도로가 아닌 하위 위계 도로망에 위치하고 있다. 즉, 권역 간 이동은 새로 개통된 고속도로보다는 여전히 전통적 간선도로인 1, 2급 도로에 의존하고 있다. 따라서 대다수 저개발국의 사례처럼 향후 예상되는 교통 수요 증가에 따른 고속도로의 역할 강화가 북한 국토의 공간구조에 미칠 영향을 주의 깊게 관찰할 필요가 있다.

본 연구에서는 북한의 교통분석에 적합한 실용적인 데이터베이스를 구축하였으며, 이를 바탕으로 네트워크 이론을 활용하여 북한 도로 네트워크의 공급 체계를 분석하였다. 향후 연구에서는 본 연구에서 구축된 자료를 기존의 남한 지역 도로 네트워크 자료와 통합하는 방법론을 개발할 필요가 있다. 또한, 북한 간선도로 네트워크의 교통량을 추정하여 북한의 교통 수요를 체계적으로 분석하여야 한다. 이를 통해 단순한 구상 차원을 넘어 한반도 통합 교통망 계획 수립의 실질적 전략을 마련할 수 있을 것이다.

목차

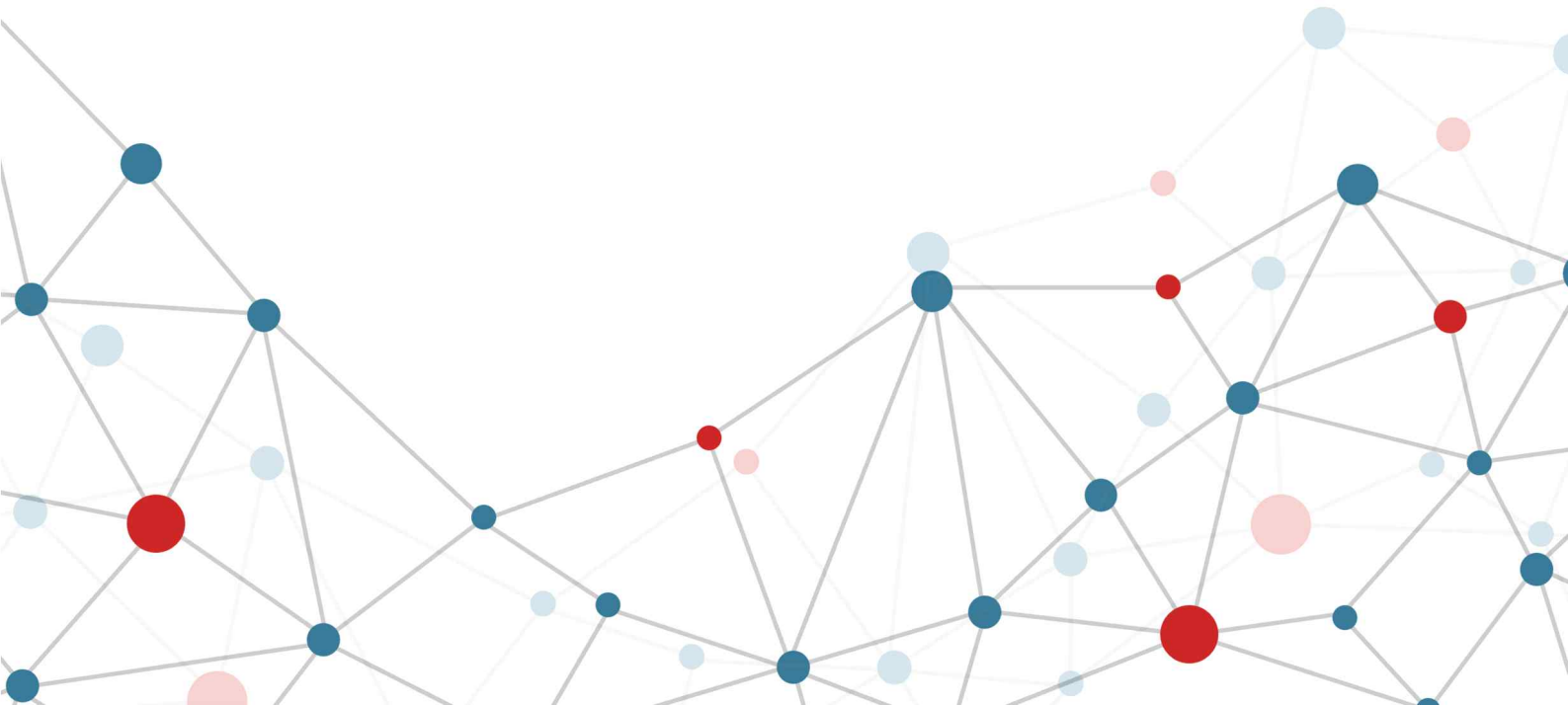
제1장 연구 개요	2
1. 연구의 배경 및 목적	2
2. 연구 내용	3
3. 연구의 범위	3
제2장 북한 도로 네트워크 데이터베이스 구축	6
1. 개요	6
2. 구축 방법	6
2.1. 원격탐사 기반 접근법	6
2.2. 공간정보 기반 접근법	7
2.3. 본 연구의 접근법	8
3. 자료 수집	8
3.1. 공간정보	8
3.2. 속성정보	9
3.3. 위성영상정보	10
4. GIS DB 구축	11
4.1. 구축 절차	11
4.2. 쟁점과 해결방안	11
5. 교통분석용 네트워크 구축	14
5.1. 구축 절차	14
5.2. 쟁점과 해결방안	15
6. 구축 결과	17

제3장 네트워크 이론 기반 북한 도로교통체계 분석	22
1. 개요	22
2. 분석 방법	22
2.1. 노드 중심성 분석	22
2.2. 커뮤니티 탐지	24
2.3. 다층적 연계성 평가	27
3. 북한 도로 네트워크의 기능적 특성	29
3.1. 연계성	29
3.2. 접근성	30
3.3. 전이성	31
3.4. 회복성	32
4. 북한 도로 네트워크의 교통권역 도출	33
4.1. 교통권역의 구성	33
4.2. 교통권역별 특성	34
5. 북한 도로 네트워크의 다층적 연계성 평가	35
5.1. 전역 연계성	35
5.2. 권역 간 연계성	37
5.3. 권역 내 연계성	39
5.4. 소결	41
제4장 결론	44
1. 연구의 의의	44
2. 연구의 한계 및 향후 과제	44
참고문헌	46

제1장

연구 개요

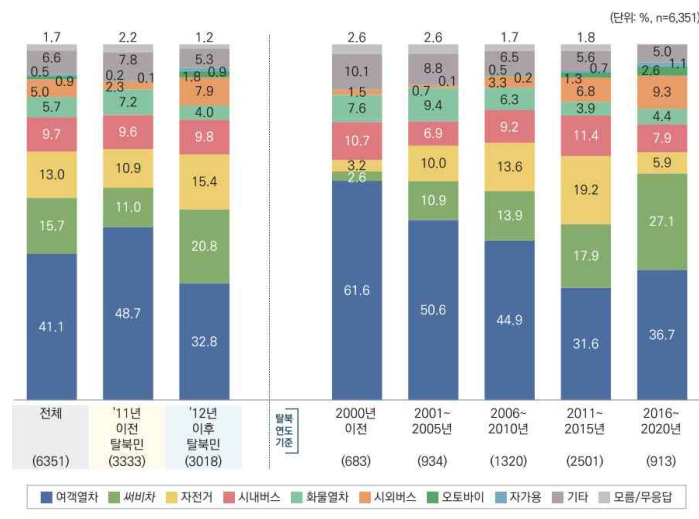
1. 연구의 배경 및 목적
2. 연구 내용
3. 연구의 범위



1. 연구의 배경 및 목적

분단 이후 북한의 교통체계는 철도 중심의 간선 교통망을 기반으로 발전해 왔으며, 도로는 이를 보조하는 단거리 이동을 지원하는 역할에 국한되었다. 그러나 1990년대 이후 에너지 공급 체계의 붕괴와 관련 산업의 쇠퇴, 그리고 극심한 경제난으로 인해 철도의 경쟁력이 크게 약화하였다. 반면 도로 운송은 높은 기동성과 상대적으로 낮은 수송 원가를 바탕으로 민간 수송 서비스가 등장하는 등 북한 주민들의 실질적 수요에 따라 빠르게 성장하고 있다(백승걸·안재영, 2022). <그림 1-1>에 정리된 탈북자들의 증언에 따르면, 2016-2020년 사이 북한이탈주민들이 인근 도시로 이동할 때 이용한 교통수단은 2000년 이전 탈북자들의 경우와 비교해 철도의 이용 비율은 절반가량 감소했지만, 시내·외버스나 자전거 등 도로 기반 교통수단의 이용은 많이 증가한 것으로 나타났다. 이러한 변화는 철도 중심으로 수립된 기존 통일 한반도 교통망 구상의 재검토를 요구하며, 북한의 도로교통 체계를 고려한 새로운 전략 수립의 필요성을 제기한다.

그러나 북한의 도로교통 체계에 관한 정량적 연구 성과는 국내외적으로 매우 부족한 실정이다. 이는 북한 지역의 특수성으로 인해 도로교통 부문의 기초 자료 확보가 제한적이기 때문이다. 이러한 데이터의 한계로 인해 실증적 연구가 거의 이루어지지 못하고 있다. 이에 본 연구는 접근할 수 있는 문헌정보와 공간정보, 위성영상정보를 활용하여 북한의 도로교통 데이터베이스를 구축하고, 이를 네트워크 이론을 통해 분석함으로써 북한 도로 교통망의 구조적 특성을 규명하고자 한다.



<그림 III-38> 가까운 도시 이동 시 이용한 교통수단

<그림 1-1> 가까운 도시 이동 시 이용한 교통수단(통일부, 2024)

2. 연구 내용

본 연구에서는 북한 도로교통 네트워크 데이터를 구축하고, 해당 데이터를 기반으로 네트워크 이론을 활용하여, 북한 도로교통 체계의 공급 특성을 파악하고자 한다. <그림 1-2>에서 보듯, 연구 내용은 크게 두 부분으로 나뉜다.

첫째, 북한 도로교통 네트워크 데이터베이스의 구축을 위해 이용 가능한 자료를 식별하고, 활용 가능한 방법론을 비교하여 효과적인 연구방법을 채택한다. 이때 위성영상정보를 활용하여 정보의 최신성과 정확성을 확보하고 데이터베이스를 고도화한다.

둘째, 구축된 데이터베이스는 북한 도로교통 네트워크의 기본 특성 분석에 이용된다. 네트워크 이론의 노드 중심성 지표를 이용하여 북한 간선도로 네트워크의 전반적인 구조적 특성과 공급 수준을 파악한다. 이후 커뮤니티 탐지 기법을 통해 공급 수준에 따른 도로 네트워크 권역을 구분한다. 도출된 각 교통권역의 특성을 종합적으로 분석하여 교통권역의 구조를 고려한 북한 도로교통망의 다층적 공급체계를 해석한다.



<그림 1-2> 연구과제의 목표 및 내용

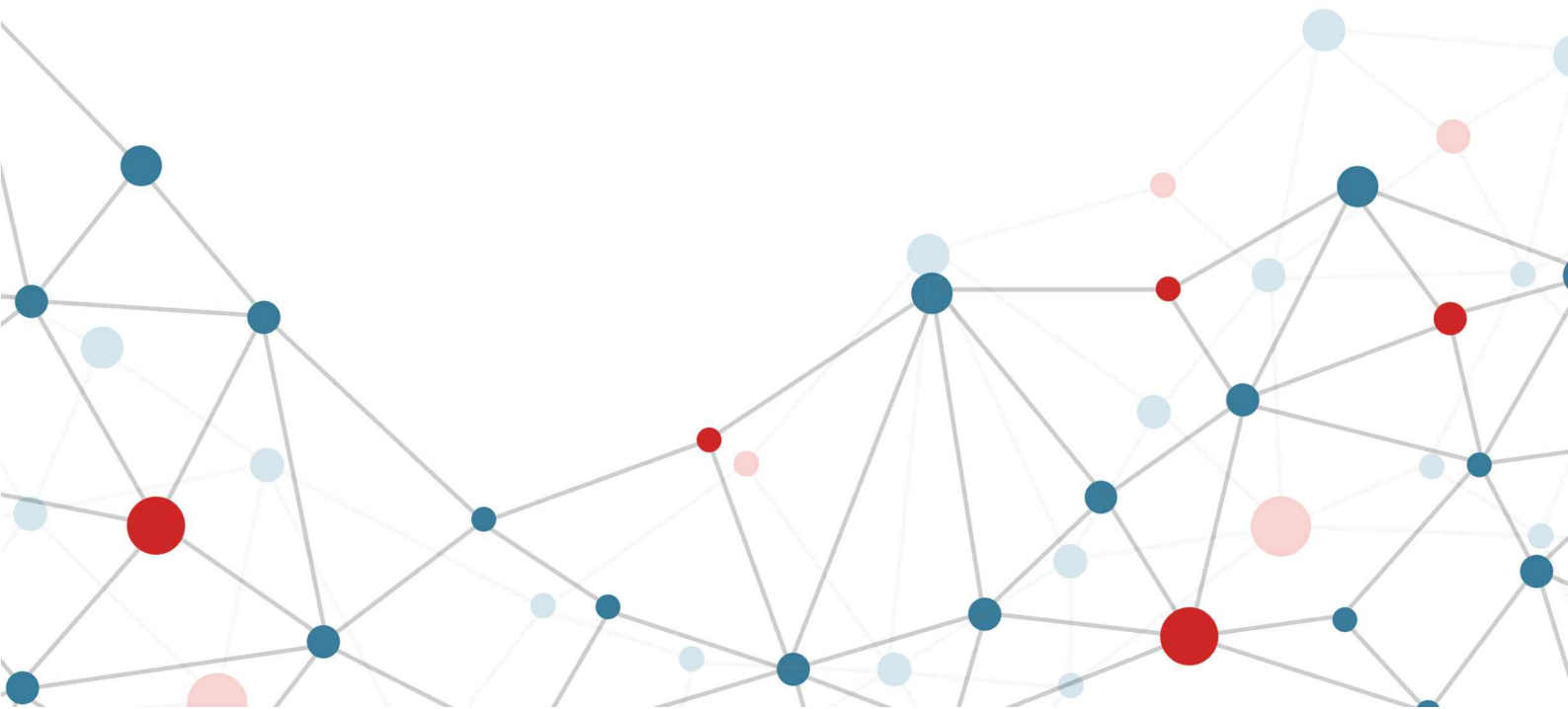
3. 연구의 범위

본 연구의 시간적 범위는 위성영상 및 관련 자료 확보가 가능한 가장 최신 시점을 기준으로 하며, 공간적 범위는 북한 전역의 간선도로망을 대상으로 한다. 북한의 도로는 고속도로, 1~6급 도로의 7개 등급으로 구분되며, 서로 다른 위계의 지역을 연결한다(교육도서출판사, 1988). 지역과 지역 사이를 연결하는 간선도로의 특성을 고려하여 본 연구는 도와 도를 연결하는 2급 도로까지를 구축 대상으로 설정하였다.

제2장

북한 도로 네트워크 데이터베이스 구축

1. 개요
2. 구축 방법
3. 자료 수집
4. GIS DB 구축
5. 교통분석용 네트워크 구축
6. 구축 결과



1. 개요

북한 체제의 폐쇄적 특성으로 인해 도로 네트워크와 같은 기초 자료를 확보하기 어렵고, 이로 인해 북한 도로교통 관련 연구 역시 제한적으로 이루어지고 있다. 기존 연구들은 대부분 북한 도로교통의 현황과 실태 파악(김연규 외, 2000; 이성수, 2005; 남정희, 2017)에 중점을 두었으며, 도로 교통망의 구조적 특성을 정량적으로 분석하는 데는 한계를 보였다. 최근에는 남북한 통합 교통망 구축을 위한 비교 연구(장석명 외, 2014; 서종원, 2022)와 정책 및 전략 제언(안병민, 2014; 백승걸, 2017; 남성욱·황주희, 2019)이 진행되고 있으나, 이 역시 자료의 한계로 인해 정량적 분석에는 이르지 못하고 있다. 따라서 북한 도로 교통망에 대한 체계적인 연구를 위해서는 정량적 분석이 가능한 기초 자료의 구축이 선행되어야 한다.

본 장에서는 북한 도로교통 관련 자료의 현황을 검토하고, 데이터베이스 구축 방법론을 제시하고자 한다. 특히 북한 간선도로망에 대한 GIS DB와 교통분석용 네트워크 데이터베이스 구축을 위해 본 연구에 적용된 하이브리드 방법론을 소개한다. 또한 데이터베이스 구축 과정에서 발생한 주요 쟁점과 그 해결방안을 정리한다.

2. 구축 방법

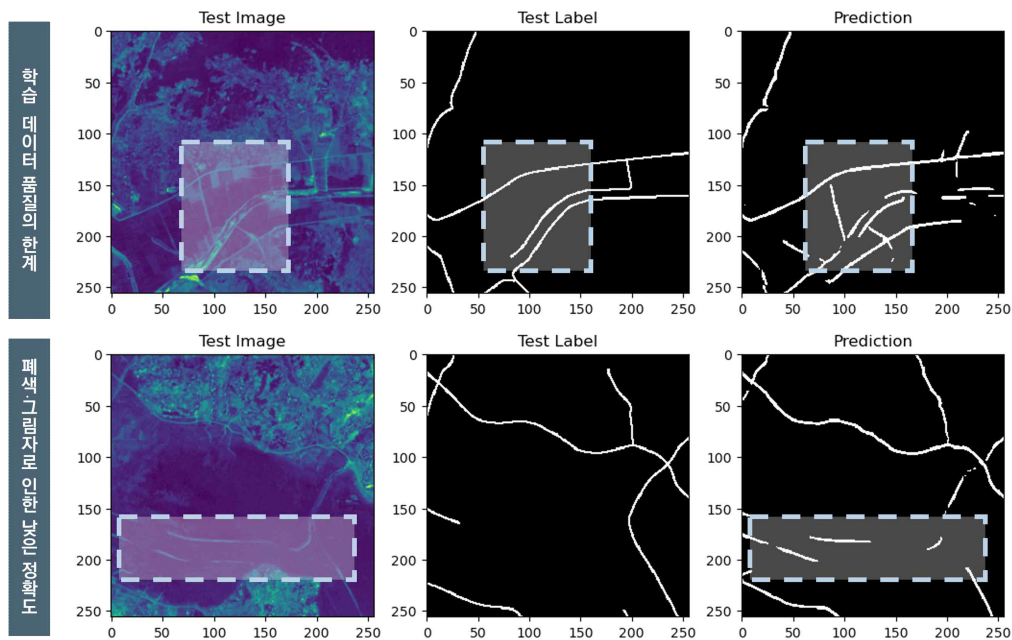
데이터베이스 구축을 위해 북한과 같이 접근이 제한된 지역의 교통망 자료 구축 사례를 검토하였다. 문헌고찰 결과, 크게 원격탐사 기반 접근법과 공간정보 기반 접근법의 두 가지 방법론이 활용되어 온 것으로 파악되었다.

1) 원격탐사 기반 접근법

먼저, 원격탐사 기반 접근법은 고해상도 위성영상 자료를 처리해 도로 영역을 식별하고 데이터를 구축하는 방법이다. 기존에는 전문 도화사가 위성영상에서 교통시설을 직접 판독하는 방식을 주로 채택하였다(권영인 외, 2005; 김인현, 2005; 사공호상 외, 2007). 그러나, 최근에는 이러한 방식의 비효율성과 비용 문제를 해결하기 위해 위성영상에 딥러닝 알고리즘을 적용하여 접근불능지역의 도로 객체를 추출하는 연구가 시도되고 있다(Kearney et al., 2020; Yang and Wang, 2020). Kim et al. (2021)은 북한의 평양 지역을 대상으로 고해상도 위성영상에 이미지 프로세싱 알고리즘을 적용하여 도로 객체를 추출, 북한 지역에 대한 위성영상 기반 접근의 가능성을 확인하였다.

이 방법은 이미지 학습에 특화된 합성곱 신경망(Convolutional Neural Networks; CNN) 계열의 딥러닝 아키텍처를 사용하여 위성영상의 특징을 학습하고, 픽셀 수준에서 도로 영역과 도로가 아닌 영역을 분류한다. 신경망 학

습을 위해서는 도로를 식별할 수 있을 만큼 높은 해상도의 위성영상과 도로 영역과 도로가 아닌 영역으로 사전에 레이블된 마스킹 자료가 필요하다. 이 접근법은 최신 위성영상을 사용하여 실질 도로 네트워크를 효율적으로 추출할 수 있으며, 광범위한 지역에 대해 일관된 방법론을 적용할 수 있어 데이터의 균일성을 확보할 수 있다. 그러나, 북한 지역의 공간정보 특성상 고품질의 학습 데이터를 확보하기 어려우며, 복잡한 지형에 의한 폐색(occlusion)과 그림자의 영향으로 도로 네트워크의 단절 및 누락이 발생하여 정확도가 저하되는 한계가 있다(그림 2-1). 이에 따라 이 방법을 적용하면 복잡한 알고리즘이나 후보정이 일반적으로 요구된다(Lian et al., 2020).



<그림 2-1> 위성영상 접근법의 한계

2) 공간정보 기반 접근법

다음으로, 공간정보 기반 접근법은 대중에게 공개된 공간정보(Open sources, Open API)를 기반으로 북한을 비롯한 접근불능지역의 도로 네트워크를 구축하는 방법이다. 비교적 최근의 연구에서, Openstreetmap (OSM) 또는 웹 지도, API와 같은 공개 공간정보를 이용하여 북한 도로 네트워크에 대한 분석을 진행한 것을 확인할 수 있다(김성민 외, 2020; 김철민, 2020; 홍일영, 2024).

이 방법은 이미 구축된 공간정보를 활용하여 도로 네트워크를 구축하는 접근법으로, 오픈소스 데이터, 국가기관에서 발행한 지도, 관련 문헌 등 사용 가능한 데이터를 최대한 수집한 후 이들을 복합적으로 활용하여 북한 도로에 대한 종합적인 이해를 도모한다. 이 접근법은 이미 구축된 공간정보를 활용할 수 있다는 점에서 최신성, 효율성 및 정보 다양성을 충족할 수 있다(Wang and Xu, 2011; Hong and Yao, 2019). 또한, 여러 유형의 데이터를 결합함으로써 더 포괄적이고 정확한 도로 네트워크 정보를 구축할 수 있으며, 지도의 범례나 문헌에서 속성정보를 비교적 쉽게 획득할 수

있어 상세한 분석이 가능하다. 그러나, 오픈소스 데이터의 신뢰도에 대한 문제가 제기될 수 있으며, 데이터의 최신성이 비교적 낮다. 또한, 서로 다른 출처와 형식의 자료를 통합할 경우, 자료 간의 불일치와 오류를 해결하기 위한 절차가 요구된다.

3) 본 연구의 접근법

앞서 살펴본 두 가지 접근법은 각각 방법론적 한계를 내포하고 있다. 이에 본 연구에서는 공간정보와 위성영상 정보를 결합한 하이브리드 방식을 통해 북한의 도로 네트워크를 구축하고자 한다. 이러한 방법은 다음과 같은 두 가지 주요 장점을 제공한다.

첫째, 두 방법론의 장점을 결합하여 각각의 한계를 상호 보완할 수 있다. 공간정보를 활용함으로써 위성영상 분석에서 발생할 수 있는 도로 단절 및 누락의 가능성을 줄여 데이터의 초기 정확도를 향상한다. 동시에 위성영상과의 대조를 통해 공간정보가 가진 최신성 부족과 데이터 통합 시의 불일치 문제를 해결할 수 있다. 둘째, 최신 위성영상 데이터와 북한에서 제작된 공간정보를 결합함으로써 외부 관찰만으로는 파악하기 어려운 북한 고유의 특성을 반영할 수 있다. 북한이 직접 발행한 1차 자료는 실제 도로망을 더 정확하게 표현하고 있으며, 북한 고유의 도로 분류체계, 명명법, 주요 결정점 정보 등을 데이터베이스에 포함할 수 있다는 장점이 있다.

3. 자료 수집

데이터베이스 구축을 위해 이용 가능한 국내외 북한 도로교통 자료를 수집하였다. 수집된 데이터는 공간정보, 도로 속성정보, 위성영상 정보로 분류할 수 있다. 세 가지 정보를 종합하여 최종 데이터베이스를 구축하게 된다. 데이터베이스 구축의 기준 자료로는 각 정보 분류에 해당하는 데이터 중, 정보의 특성에 따라 적합도가 가장 높은 데이터를 선정하였다.

1) 공간정보

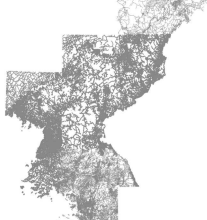
공간정보는 도로의 공간적 위치와 형상을 나타내는 정보로, 주로 선(links)과 점(nodes)의 형태로 표현된다. 공간정보의 기준이 되는 자료를 선정하기 위하여 <표 2-1>과 같이 국내외에서 발간된 북한 도로 네트워크 공간정보를 수집하였다. 기준 자료 선정의 기준으로 자료의 신뢰성과 정보량, 그리고 활용 시 편의성을 고려하였다.

그 결과, 최종적으로 국토지리정보원에서 제작한 ‘북한 수치지도’가 공간정보의 기준 자료로 선정되었다. 북한 수치지도는 국가 공간정보 구축 기관인 국토지리정보원이 제작하여서 신뢰성이 높으며, 가장 많은 도로 공간정보가 포함되어 있다. 또한, 디지털 파일로 제공되어 이미지 정보에 비해 활용하기 쉽다는 이점이 있다. 본 연구에서는 2020년에 구축된 1:250,000 축척의 수치지도를 활용하였다.

<표 2-1> 수집된 공간정보 목록

자료명	Openstreetmap	대한민국전도	북한지도 도로망	북한도로망도
발행처 (연도)	Openstreetmap (2024)	국토지리정보원 (2021)	통일부 북한정보포털 (2024)	한국교통연구원 동북아북한교통연구센터 (2019)
도로구분	Primary, trunk, motorway	고속국도, 일반국도, 지방도	고속도로, 1-2급도로	고속도로, 1-3급도로
자료유형	shp	shp	웹 지도	보고서
속성정보	ID, 코드, 도로유형, 도로 명, 제한속도, 다리, 터널	번호, 코드, 도로길이, 도로명	도로명, 등급, 총연장, 노폭, 노면상태	도로명, 등급, 총연장
자료 예시				

<표 2-1> 수집된 공간정보 목록(이어서)

자료명	수치지도	북한 도로 지도	DPRK Map
발행처 (연도)	국토지리정보원(2010~11)	KDB 산업은행(2020)	UN(2004)
도로구분	고속도로, 국도, 지방도, 미분류 등	고속도로, 1-3급 도로	Expressway, Main road, Secondary road
자료유형	dxf	이미지	이미지
속성정보	등급	등급	등급
자료 예시			

2) 속성정보

속성정보는 해당 도로의 등급, 차로 수, 시종점과 같이 공간정보에 더해 실제 도로의 기능과 특성을 확인할 수 있는 정보를 의미한다. 도로 속성정보의 기준이 되는 자료를 선정하기 위하여 <표 2-2>와 같이 북한에서 발간된 도로 네트워크 자료를 수집하였다. 기준 자료 선정의 기준으로 자료의 원천성과 완전성, 그리고 최신성을 고려하였다.

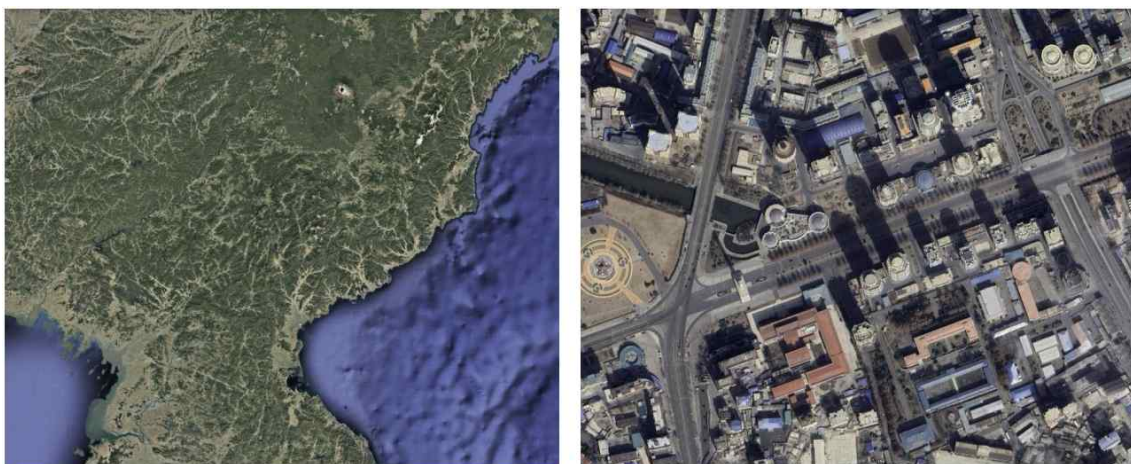
그 결과, 최종적으로 북한 교육도서출판사에서 발행한 도로망 지도인 ‘도로리정도’가 기준 자료로 선정되었다. 도로리정도는 북한에서 발간된 1차자료로 그 원천성이 높으며, 획득할 수 있는 자료 중 가장 최근인 2017년에 발간된 자료로서 현행화가 쉽다는 장점이 있다. 특히, 도로등급 정보가 자세히 제공된다는 점에서 다른 자료에 비해 완전성이 높는데, 선의 굵기와 형태를 달리하여 고속도로, 1급 도로, 2급 도로, 3급 도로, 기타도로의 위계 정보를 표현하고 있다.

<표 2-2> 수집된 속성정보 목록

자료명	발행처(발행년도)	자료형태	비고
조선지리지전서(운수지리)	교육도서출판사(1988)	단행본	도로망 지도 부재
조선지도집	교육도서출판사(1997)	단행본	도로등급 미구분
최신 조선지도	학우서방(1999)	단행본	도로등급 미구분
도로리정도	교육도서출판사(2006)	이미지	-
조선대백과사전	백과사전출판사(1998)	단행본	도로등급 미구분
광명백과사전	백과사전출판사(2011)	단행본	도로등급 미구분
조선향토대백과	한국평화문제연구소, 조선과학백과사전출판사(2004)	단행본	도로등급 미구분
조선지도	조선민주주의인민공화국 지도출판사(2009)	소책자	도로등급 체계 상이

3) 위성영상정보

네트워크를 구축하면서 발생한 쟁점을 해결하기 위하여 추가적으로 위성영상정보를 활용하였다. 위성영상 정보의 경우, 이미지 공간정보이자 영상 판독을 통한 속성정보 확인이 가능하다는 점에서, 위의 두 정보에서 발생하는 제약과 공백을 보완할 수 있다. 본 연구에서는 구글어스(Google Earth)에서 제공하는 위성영상을 활용하였다(그림 2-2). 이는 북한과 같이 접근이 어려운 지역에 대해서도 최신 영상을 제공하므로, 현행화가 가능하기 때문이다. 또한 위성영상 픽셀과 지리좌표 일치 작업이 이미 수행되어 있어, GIS 데이터와의 통합 시 별도의 전처리 과정이 필요하지 않다. 본 연구에 활용된 구글어스 위성영상은 2020년대에 촬영된 것으로, 프랑스 국립우주연구센터(Centre National d'Etudes Spatiales: CNES), Airbus, Maxar Technologies에 의하여 제공된 데이터이다.

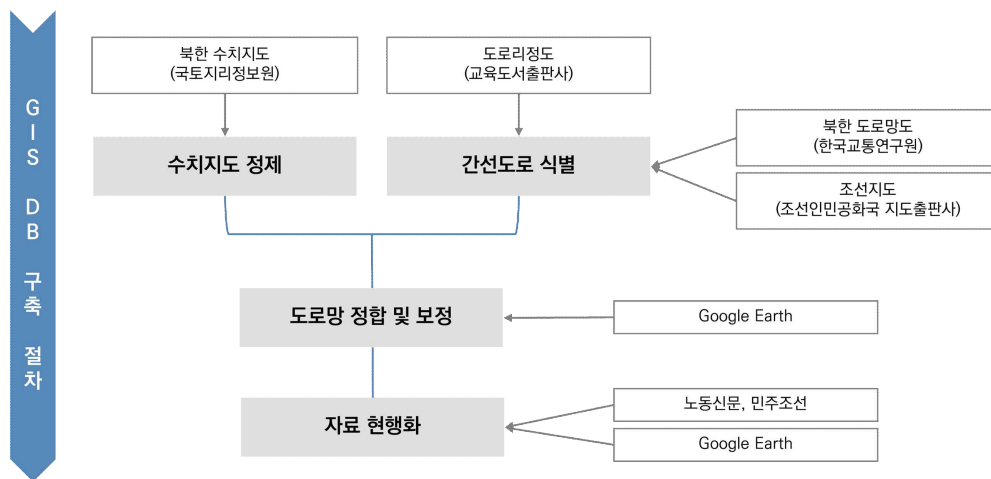


<그림 2-2> 북한 지역 위성영상 예시

4. GIS DB 구축

1) 구축 절차

GIS DB 구축은 속성정보인 도로리정도를 기준으로 공간정보인 국토지리정보원의 북한 수치지도를 정위치 편집하는 작업이다. 복잡하고 부정확한 수치지도를 북한 원천자료인 도로리정도를 기준으로 정제하고 보완하는 과정을 거치게 된다.



<그림 2-3> GIS DB 구축 절차

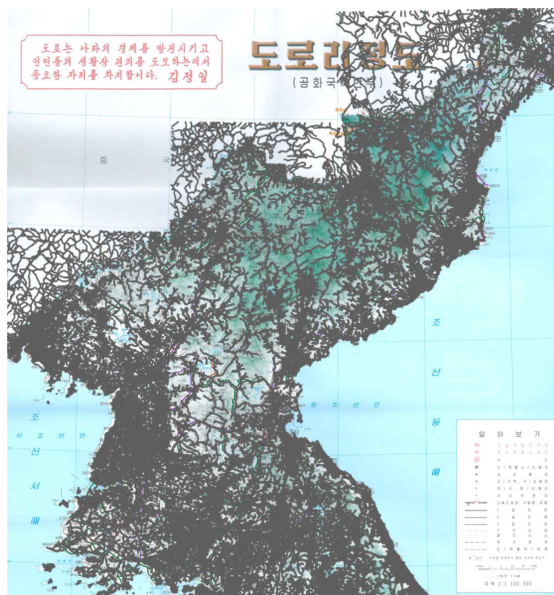
GISDB 구축 절차는 <그림 2-3>과 같이 수치지도 정제, 간선도로 식별, 도로망 정합 및 보정, 자료 현행화의 네 단계로 구성된다. 첫째, 수치지도 정제 단계에서는 북한 전역을 포함하는 14장의 도엽을 통합하고, 수치지도 지형지물 표준코드를 이용해 도로 시설만을 추출하였다. 둘째, 간선도로 식별 단계에서는 북한의 도로리정도를 바탕으로 본 연구의 구축 대상인 고속도로, 1급 도로, 2급 도로를 확정하였다. 셋째, 도로망 정합 및 보정 단계에서는 수치지도의 도로 선형과 도로리정도에서 식별된 간선도로의 선형을 대조하고 필요한 경우 수정하였다. 마지막으로, 자료 현행화 단계에서는 수치지도 구축 이후 신설된 도로를 데이터에 반영하는데, 이를 위해 언론 기사와 최신 위성영상을 확인하였다.

2) 쟁점과 해결방안

GIS DB 구축 작업 과정에서 총 네 가지 쟁점을 정리할 수 있었다. 첫 번째 쟁점은 구축 대상 구간의 선정이다. 본 연구에서는 간선도로망을 구축 대상으로 선정하였다. 따라서 속성정보 기준 자료인 도로리정도의 범례를 기준으로 고속도로, 1급 도로, 2급 도로를 구분하였다. 이때 2급 도로와 3급 도로의 범례 간 구분이 모호하여 2급 도로를 구별하기 어려웠다.

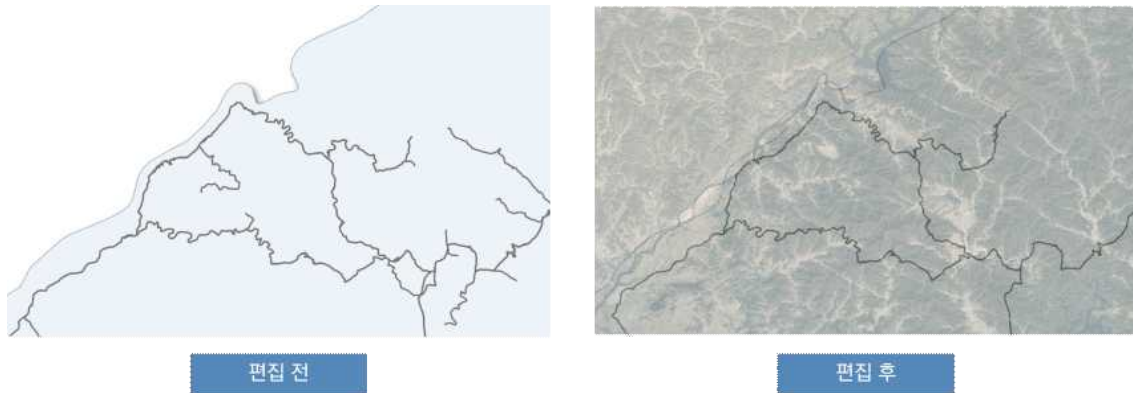
2급 도로 구간을 확정하기 위해 보조자료인 북한 도로망도와 조선지도도를 참고하여 1차 선별, 2차 검증의 두 가지 단계를 수행하였다. 1차 선별 단계에서는 2019년 발간된 한국교통연구원의 북한 도로망도를 활용하였다. 북한 도로망도는 본 연구와 동일한 도로 등급을 설정하면서 시종점 또한 명확하게 제시되어 비교가 용이하므로, 이를 기준으로 2급 도로에 해당하는 구간을 식별하였다. 다음으로, 2차 검증 단계에서는 조선지도와의 비교를 통해 1차 선별된 구간을 재검토하였다. 조선지도는 2009년 조선민주주의인민공화국 지도출판사에서 발행된 전도(全圖)로, 도로 등급을 주요도로와 보통도로로 구분한다. 주요도로는 고속도로, 1급 도로, 2급 도로가 포함된다. 따라서, 첫 번째 단계에서 2급 도로에 해당하면서 두 번째 단계에서 주요 도로에 해당하는 구간만 2급 도로로 최종 선정하였다. 두 차례의 확인을 통해 명확성과 원천성을 확보하게 되므로, 최종 선정된 구간은 2급 도로일 확률이 높을 것으로 판단했다.

선정된 구축 대상 구간을 수치지도와 매칭하여 GIS 데이터 형태로 구축하였다. <그림 2-4>와 같이 도로리정도 래스터 이미지 파일에 좌표값을 할당하여 공간정보 데이터인 수치지도와 직접적으로 비교하였다.



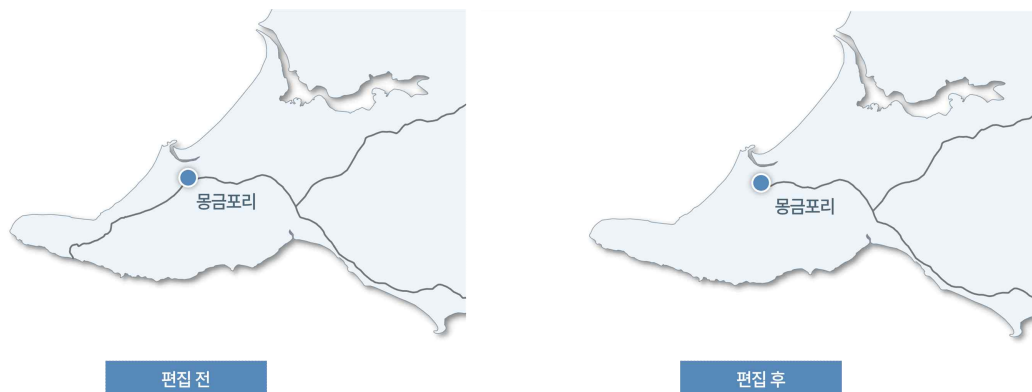
<그림 2-4> 지오레퍼런싱된 도로리정도 이미지

두 번째 쟁점은 수치지도의 여러 선형 중 추출 대상 도로를 식별하는 것이다. 수치지도는 본 연구의 구축 대상인 간선도로는 물론 지선도로를 모두 포함하고 있으며, 일부 도로가 아닌 구간이 도로 객체로 구분되어 있는 사례 또한 확인되었다. 데이터의 정확성을 확보하기 위해서는 수치지도에서 간선도로만 추출해야 하며, 본 연구에서는 이를 위해 <그림 2-5>와 같이 위성영상 정보를 교차대조하여 구축 대상인 도로 객체를 판별하고 편집하였다. 예컨대 기존 선형이 하천과 기차길을 포함하고 있으면 수정하였고, 터널 및 그림자에 의해 가려진 도로 선형을 추가하였다. 위성영상이 제공하는 고해상도의 시각 정보는 지표의 다양한 특징을 명확하게 나타내므로, 이를 통해 주요 간선도로와 지선도로를 구분할 수 있다. 또한, 하천과 같이 도로와 유사한 선형 구조로 나타나는 비도로 객체를 제외함으로써 데이터의 오류를 줄일 수 있다.



<그림 2-5> 객체 판별 문제 사례 지역

세 번째 쟁점은 도로의 시점과 종점을 특정하는 것이다. 도로리정도와 수치지도를 중첩(overlay)하여 비교 후 가장 유사하거나 동일한 선형 객체를 선택하는 과정에서, 수치지도 도로 선형의 시점과 종점을 어떻게 특정할 것인지에 대한 문제가 발생하였다 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 도로리정도에 표기된 시종점 지역명을 기준으로 하여, 해당 지역의 시내도로와 연결되는 지점까지를 구축 대상 도로로 판단하였다. 예를 들어, <그림 2-6>에서 보듯 기종점 지역을 통과한 이후의 도로가 데이터베이스에서 제외된 것을 확인할 수 있다. 이 사례 지역의 경우, 도로리정도에서는 룡연-몽금포리를 잇는 도로로 나타난다. 따라서 몽금포리를 최종 종점으로 지정하였다. 이러한 접근 방식을 채택한 이유는 도로리정도 상의 지역명이 시종점에 대한 객관적이고 명확한 기준점을 제공하기 때문이며, 시내도로와의 연결점을 기준으로 도로의 시종점을 일괄적으로 편집하여 데이터의 연속성과 일관성을 유지할 수 있기 때문이다.



<그림 2-6> 도로 시종점 문제 사례 지역

네 번째 쟁점은 수치지도 구축 이후에 건설된 도로를 데이터베이스에 반영하는 것이다. 국토지리정보원의 수치지도는 2020년에 구축된 자료로, 이후 새로 개통된 도로에 대한 정보가 반영되지 않아 현행화가 요구된다. 이를 위하여, 본 연구에서는 노동신문, 민주조선 등의 북한 발간 언론자료를 통해 2020년에서 2023년까지의 도로교통 관련 기사를

수집하여 도로 신설 여부를 조사한 후, 전후 시기 위성영상 자료와 대조해 DB 반영 여부를 판단하였다. 즉, 언론자료와 위성영상 정보를 동시에 활용하여 접근이 제한된 북한 지역에 대한 자료의 신뢰성을 높이고자 하였다. 북한 언론 자료 조사 결과, 해당 기간 2개의 교량이 신설되었음을 확인하였다. 그 중 자강도 강계시 곡하다리의 경우, <그림 2-7>에서 확인할 수 있듯 서창역(곡하역) 인근에서 신규 건설된 교량을 발견할 수 있었으나, 해당 교량이 간선도로와 연결되지 않는 것으로 판단되어 최종 제외하였다. 함경북도 화대군 남대천2다리의 경우, 2023년 준공된 것으로 보도되었으나 위성영상에서 식별되지 않아 최종 제외되었다.

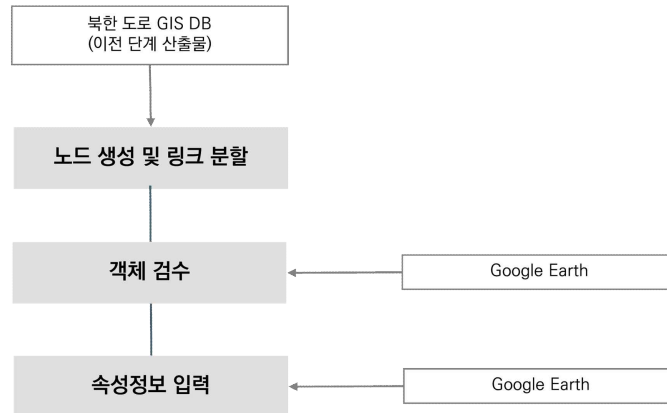


<그림 2-7> 곡하다리, 남대천2다리 인근 위성영상 비교

5. 교통분석용 네트워크 구축

1) 구축 절차

구축된 GIS DB의 경우, 선형 공간정보만을 포함하여 교통분석에서 필요로 하는 노드 및 링크 단위로 구성되지 않는다. 네트워크 정보로 전환되어야, 속성정보를 이용하여 다양한 분석을 수행할 수 있다. 따라서 추가적인 가공과 구조화 편집을 통해 교통분석용 네트워크를 구축하였다.

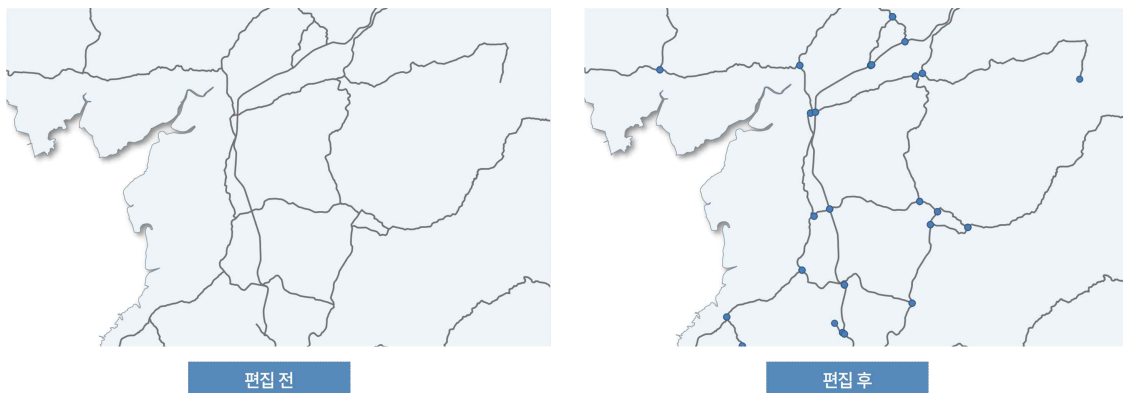


<그림 2-8> 교통분석용 네트워크 구축 절차

교통분석용 네트워크 구축 절차는 <그림 2-8>과 같이, 노드 생성 및 링크 분할, 객체 검수, 속성정보 입력의 세 단계로 구성된다. 첫째, 노드 생성 및 링크 분할 단계에서는 GIS DB의 단순 선형 공간정보를 노드와 링크로 구성된 네트워크 객체 단위로 변환하였다. 둘째, 객체 검수 단계에서는 네트워크 객체 간의 연결성을 확인하고 필요한 경우 수정 보완하였다. 마지막으로, 속성정보 입력 단계에서는 교통분석에 요구되는 링크의 속성정보를 수집하여 입력하였다.

2) 쟁점과 해결방안

교통분석용 네트워크 구축 과정에서도 네 가지 쟁점을 확인할 수 있었다. 첫 번째 쟁점은 공간정보를 네트워크 객체 단위로 변환하는 것이다. 앞선 단계에서 구축된 GIS DB는 단순 선형의 공간정보로, 교통분석을 위해서는 이를 네트워크를 구성하는 객체 단위인 노드와 링크로 재편집하여야 한다. 이를 위해, <그림 2-9>와 같이 GIS DB의 선형을 기준으로 발생하는 모든 교차점, 도로가 끝나는 지점, 도로 등급이 변화하는 지점을 노드로 설정하였다. 그리고 생성된 노드와 노드 사이를 연결하는 구간을 하나의 링크로 보았다.



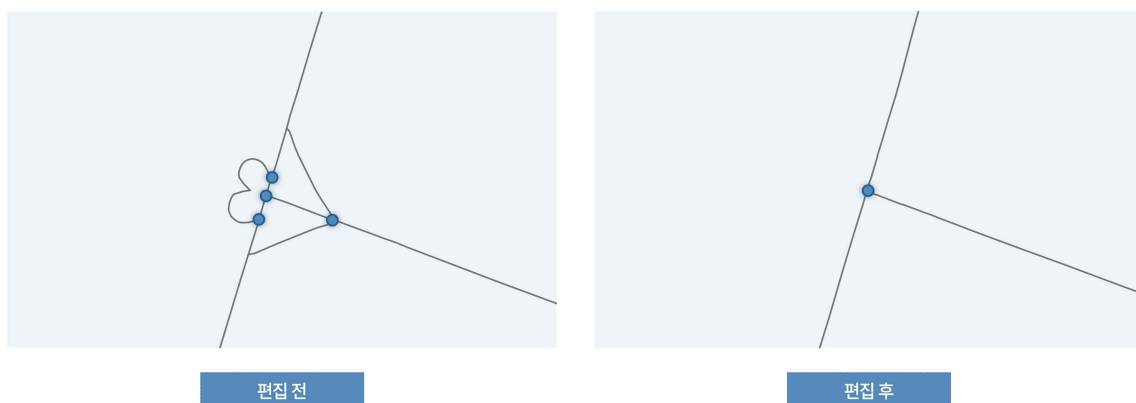
<그림 2-9> 노드 및 링크 생성

두 번째 쟁점은 네트워크 연결성을 확보하는 것이다. 본 연구에서는 구축 대상을 간선도로로 한정하였기 때문에 도로가 단절된 구간이 나타난다. <그림 2-10>과 같이, 평양과 같은 대도시 지역에서는 시내도로 구간이 생략되면서 간선도로 간 연결성이 확보되지 않는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해, 본 연구에서는 직할시와 특별시 등 대도시 지역에 대해 왕복 6차로 이상의 시내도로를 네트워크에 추가하였다. 이때 위성영상 정보와 대조하면서 시내도로의 차선 수를 확인할 수 있었다. 대도시 내부 시내도로는 많은 차로 수를 보이는 주요도로로, 네트워크의 연결성을 향상시킬 수 있으며, 간선도로에 포함하는 것이 적절한 것으로 판단된다.



<그림 2-10> 네트워크 연결성 확보 사례 지역

세 번째 쟁점은 교차부를 단순화하여 데이터의 신뢰성을 향상하는 것이다. 노드·링크 단위로의 변환 작업에서는 모든 교차지점을 노드로 표현하기 때문에 입체 교차부의 경우 <그림 2-11>과 같이 하나의 교차부에 여러 개의 노드가 생성된다. 이 문제를 해결하기 위해, 하나의 교차부에 중복 노드가 생성되는 경우 하나의 노드만을 생성하도록 데이터를 수정하였다. 이는 실질적인 네트워크 구조를 반영할 수 있도록 데이터를 단순화하기 위함이다.



<그림 2-11> 교차부 단순화 사례 지역

네 번째 쟁점은 입력할 속성정보를 결정하는 것이다. 앞선 단계에서 구축된 GIS DB에는 단순 공간정보만이 포함되므로, 교통분석을 위해서는 관련된 속성정보를 공간정보에 기입하여야 한다. 이를 위해 기입 가능한 속성정보를 조사하였으며, 최종적으로 차로 수가 선택되었다. 차로 수는 도로의 용량을 결정하는 핵심 요인이며, 타 지표와 달리 문헌자료와 위성영상을 통해 신뢰도 높은 자료를 확보할 수 있는 장점이 있다.

북한의 경우, 고속도로는 왕복 4차로 이상, 1급 도로는 왕복 2차로 이상, 2급 도로는 왕복 2차로로 구성된다(표 2-3). 따라서, 본 연구에서는 1:10 축척의 위성영상 자료에서 고속도로와 1급 도로의 링크별 차로 수를 판독하여 속성정보로 입력하였다. 또한, 문헌에 근거하여 2급 도로의 차로 수를 왕복 2차로로 간주, 속성정보로 입력하였다.

<표 2-3> 북한의 도로 위계(교육도서출판사, 1988)

도로등급	역할 (연결지점)	요소별 기준					전망운행세기 (대/일)
		차선수 (개)	차선너비 (m)	차길너비 (m)	노면너비 (m)	노반너비 (m)	
고속	중앙-도	4이상	3.5~4	14.0이상	1.5~4*	17.0이상	5,500 이상
1급	중앙-도	2이상	3.5	7.0이상	1.5이상	10.0이상	5,500 이상
2급	도-도	2	3.5	7.0	1.0	9.0	2,500~5,500
3급	도-군/군-군	2	3.0	6.0	0.75	7.5	800~2,500
4급	군-리	2	2.75	6.0	0.5	6.5	300~800
5급	리-리	2	2.5	5.0	-	5.0	150~300
6급	리 내부 포전도로	1	-	3.0~3.5	-	3.0~3.5	-

6. 구축 결과

최종적으로 <그림 2-12>, <표 2-4>, <표 2-5>, <표 2-6>과 같이 노드 282개, 링크 381개의 교통분석용 북한 도로망 데이터베이스가 구축되었다. 교차점, 시종점, 속성변화점 세 종류의 노드로 구성되는데, 교차점은 두 개의 도로가 만나는 지점을 나타내고, 시종점은 도로가 이어지지 않고 끝나는 지점, 속성변화점은 도로의 등급이 바뀌는 지점을 나타낸다. 링크는 노드와 노드의 사이 구간으로, 그 속성은 고속도로, 1급도로, 2급도로, 시내도로의 네 종류로 구성된다.

최종 구축된 데이터베이스는 GIS shp 파일 형식으로, 향후 다양한 북한 도로교통 연구 시 활용될 수 있을 것으로 보인다. 본 연구에서는 해당 데이터베이스를 활용하여, 네트워크 이론을 적용한 정량적 북한 도로교통체계 분석을 시도하였다.



<그림 2-12> 교통분석용 북한 도로 네트워크

<표 2-4> 북한 도로 네트워크 데이터베이스 구성

구분	유형	객체 수(개)	총 연장(km)	평균 차로 수(편도 기준)
노드	교차점	225	-	-
	시종점	46	-	-
	속성변화점	11	-	-
링크	고속도로	39	715	3
	1급 도로	115	2,317	1.3
	2급 도로	186	5,109	1
	시내도로	41	85	3

<표 2-5> 최종 노드 속성정보 예시

NODE_ID	TYPE	ADMIN	X_COORD	Y_COORD
n1	교차점	황해남도	13962829.57	4659848.78
n2	교차점	평안남도	14064782.06	4809673.35
n3	교차점	함경북도	14442768.34	5228542.99
n4	교차점	평안북도	13848983.58	4880856.04
n5	교차점	평안북도	13884443.63	4908151.46

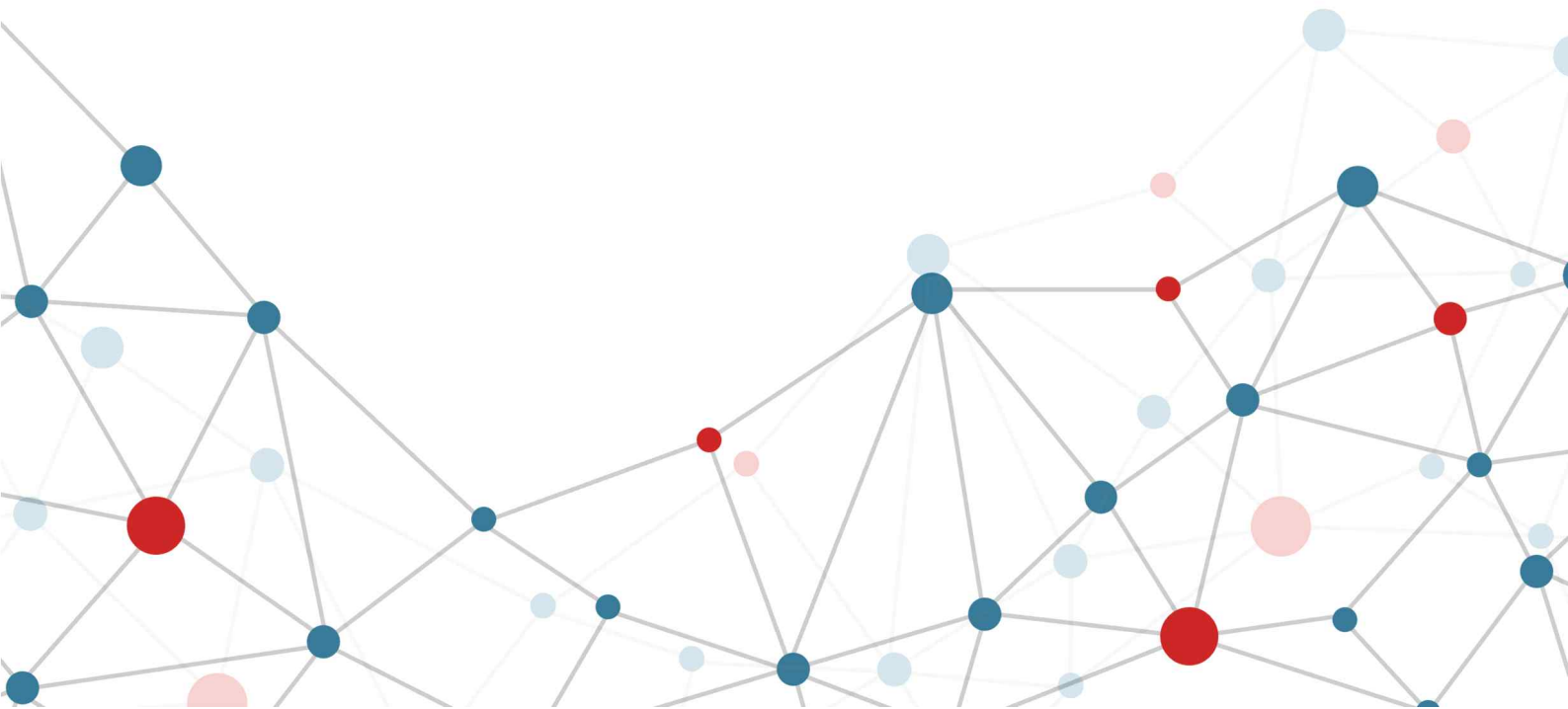
<표 2-6> 최종 링크 속성정보 예시

LINK_ID	RANK	LANE	S_NODE	E_NODE	LENGTH
h1	고속도로	3	n50	n278	9825
h2	고속도로	3	n53	n50	21336
h3	고속도로	3	n58	n53	15668
h4	고속도로	3	n59	n58	4335
h5	고속도로	3	n295	n305	3458

제3장

네트워크 이론 기반 북한 도로교통체계 분석

1. 개요
2. 분석 방법
3. 북한 도로 네트워크의 기능적 특성
4. 북한 도로 네트워크의 교통권역 도출
5. 북한 도로 네트워크의 다층적 연계성 평가



1. 개요

북한의 도로 네트워크는 일반적인 교통망과는 차별화되는 독특한 특성을 보인다. 이는 크게 두 가지 측면에서 기인한다. 첫째는 지형적 특수성으로, 국토의 약 80%가 산악지형으로 구성되어 있어 도로망 구축과 운영에 상당한 제약이 존재한다. 이러한 지형적 특성은 도로 네트워크의 연결성을 제한하고, 전반적인 교통 효율성을 저하한다. 둘째는 정치·사회적 특수성으로, 북한의 폐쇄적 사회구조와 엄격한 이동통제 정책은 도로망의 양적, 질적 공급 전략에 큰 영향을 미친다. 이는 단순한 물리적 연결성을 넘어서, 실제 통행 가능성과 효율성에 직접적인 제약요인으로 작용한다. 특히, 특정 지역 간 교류가 정책적으로 제한되거나 왜곡되는 현상이 발생하며, 이는 도로 네트워크의 기능적 특성을 이해하는 데 중요한 고려사항으로 작용한다.

기존의 도로망 분석 연구들은 주로 단일 방법론에 의존하여 네트워크의 특성을 파악하고자 하였다(Hong et al., 2019; Li et al., 2020; Reza et al., 2024; Wei and Wang, 2024). 그러나 북한과 같이 복잡한 지형적, 사회적 특성을 보이는 지역의 도로망을 분석하기 위해서는 보다 종합적인 접근이 요구된다. 특히, 도로 네트워크의 다층적 특성을 고려할 수 있는 분석 틀이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 북한 도로 네트워크의 구조적 특성을 분석하고, 실질적 교통권역을 도출하여 권역 내부와 권역 간의 연계성을 평가하고자 한다. 또한, 이를 종합하여 북한 도로 네트워크의 다층적 특성을 규명하고자 한다.

2. 분석 방법

본 연구는 북한 간선도로 네트워크의 구조적 특성을 분석하기 위해 중심성 분석, 커뮤니티 탐지, 그리고 이들의 종합 분석이라는 세 가지 접근 방법을 채택하였다. 각각의 방법론은 네트워크의 서로 다른 측면을 조명하며, 이를 통합함으로써 북한 도로망에 대한 포괄적인 이해를 도모할 수 있다.

1) 노드 중심성 분석

먼저, 북한 도로 네트워크의 기능적 특성을 분석하기 위해 주요 특성을 선정하고 그에 적합한 지표를 측정, 분석하였다. 교통 네트워크의 특성인 연계성(Connectivity), 접근성(Accessibility), 전이성(Transferability), 회복성(Resilience)은 각기 다른 방식으로 네트워크의 효율성과 안정성 등을 좌우한다. 따라서, 본 연구에서는 이 네 가지 특성을 분석함으로써 교통망이 원활하게 기능할 수 있는지, 사용자가 효율적으로 목적지에 도달할 수 있는지, 그리고 네

트위크가 장애나 충격에 얼마나 잘 대응할 수 있는지를 평가하고자 하였다. 네 가지 특성은 <표 3-1>에 제시된 노드 중심성 지표를 통해 평가된다.

<표 3-1> 노드 중심성 지표 정의

특성	지표	산출식
연계성 (Connectivity)	연결강도 중심성 (Strength Centrality, C_S)	$C_S(i) = \sum_{j \neq i} w(i, j)$ $w(i, j) = \text{노드 } i \text{와 노드 } j \text{를 연결하는 링크 가중치}$ $i = \text{분석 노드}$ $j = \text{네트워크에 존재하는 노드}$
접근성 (Accessibility)	근접 중심성 (Closeness Centrality, C_C)	$C_C(i) = \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i} d(i, j)$ $d(i, j) = \text{노드 } i \text{부터 노드 } j \text{까지 최단거리}$ $N = \text{네트워크 전체 노드 수}$
전이성 (Transferability)	매개 중심성 (Betweenness Centrality, C_B)	$C_B(i) = \sum_{h \neq i \neq j} \frac{\sigma_{hj}(i)}{\sigma_{hj}}$ $\sigma_{hj} = \text{노드 } j \text{와 노드 } h \text{를 잇는 모든 최단경로의 합}$ $\sigma_{hj}(i) = \text{최단경로 중 노드 } i \text{를 지나는 경로의 수}$
회복성 (Resilience)	효율 중심성 (Efficiency Centrality, C_E)	$C_E(i) = \frac{\frac{1}{(N-1)(N-2)} \sum_{h \neq i \neq j} \frac{1}{d(h, j - i)}}{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{h \neq j} \frac{1}{d(h, j)}}$ $d(h, j - i) = \text{노드 } i \text{가 제거된 네트워크에서 노드 } h \text{부터 노드 } j \text{까지 최단거리}$

연계성은 교통망 내 노드 간의 상호 연결 정도와 네트워크의 구조적 완결성을 나타내는 위상학적 특성이다. 이를 측정하는 지표로는 Degree Centrality (Freeman, 1978), Eigenvector Centrality (Bonacich, 1987), PageRank Centrality (Brin and Page, 1998) 등이 있다. 본 연구는 Degree Centrality를 기반으로 연계성을 측정하였는데, 노드의 직접적인 연결 관계를 직관적이고 명확하게 보여줄 수 있기 때문이다. 이 지표는 각 노드에 연결된 링크의 개수를 측정함으로써, 해당 노드가 네트워크 내에서 얼마나 많은 다른 노드와 직접적으로 연결되어 있는지를 보여준다. 본 연구에서는 Degree Centrality에 가중치를 적용한 Strength Centrality를 활용하였다.

접근성은 이용자가 목적지에 도착하기 위해 교통망의 통행 저항을 얼마나 쉽게 극복할 수 있는지를 나타내는 위상학적 특성이다. 이를 측정하는 지표로는 Closeness Centrality (Freeman, 1978), Residual Closeness (Dangalchev, 2006) 등이 있다. 본 연구는 Closeness Centrality를 통해 접근성을 측정하였는데, 이동 거리를

기반으로 접근성을 평가하며, 평균적인 이동 용이성을 정량적으로 나타낼 수 있기 때문이다. 이 지표는 네트워크 내 다른 지점까지의 도달 용이성을 측정하며, 한 노드가 네트워크 내의 다른 모든 노드에 얼마나 빠르게 도달할 수 있는지를 보여주는 핵심적인 척도이다.

전이성은 교통망 내에서 목적지 변경의 용이성을 나타내는 위상학적 특성이다. 이를 측정하는 지표로는 Betweenness Centrality (Freeman, 2002), Flow Betweenness Centrality (Freeman et al., 1991) 등이 있다. 본 연구는 Betweenness Centrality를 활용하여 전이성을 측정하였는데, 특정 노드가 최단 경로상에서 얼마나 자주 이용되는지를 평가하여 해당 노드의 중요성을 측정할 수 있기 때문이다. 이는 다양한 목적지로의 변경 가능성을 평가하며, 특정 노드를 지나는 최단경로의 수를 측정함으로써 해당 노드의 중요성을 파악한다.

회복성은 교통망이 외부 충격이나 교란에 대응하여 본래의 기능을 유지하거나 신속히 회복할 수 있는 시스템적 역량을 의미한다. 이를 측정하는 지표로는 Efficiency Centrality (Wang et al., 2017), Redundancy Centrality (Borgatti, 1997) 등이 있다. 본 연구는 Efficiency Centrality를 통해 회복성을 측정하였는데, 핵심 노드의 기능 상실이 전체 시스템에 미치는 영향을 효과적으로 분석할 수 있기 때문이다. 이 지표는 개별 노드를 네트워크에서 제거하는 것이 전체 네트워크의 효율성에 미치는 영향을 측정하여 해당 노드의 중요성을 파악한다.

2) 커뮤니티 탐지

다음으로, 북한 도로 네트워크의 교통권역을 식별하기 위해 커뮤니티 탐지 기법을 활용하였다. 커뮤니티 탐지는 기존 네트워크의 정보만을 활용하여 노드를 여러 개의 집단으로 구분하고 각 커뮤니티를 식별하는 방법이다. 이 방법은 네트워크 내 노드 간의 연결 패턴을 객관적으로 분석하여 자연스럽게 형성되는 커뮤니티를 도출할 수 있기 때문에, 교통 네트워크의 실제 연결 특성과 흐름을 반영하여 교통권역을 정의하는 데 적합하다. 이를 통해 행정 구역이나 연구자의 주관적 판단에 의존하지 않고 도로망의 기능적 구성을 일관되게 파악할 수 있다(Fortunato and Hric, 2016).

커뮤니티 탐지 기법은 통계적 추론 기반 방법, 최적화 기반 방법, 다이내믹스 기반 방법의 세 가지로 분류할 수 있다. 통계적 추론 기반 방법은 네트워크 데이터를 설명할 수 있는 인위적인 생성 모델을 설정하고 데이터를 해당 모델에 맞추는 것으로, Stochastic Block Model (Holland et al., 1983)이 대표적이다. 다음으로, 최적화 기반 방법은 네트워크 클러스터링 품질의 최대화를 목적함수로 클러스터링을 진행하는 것으로, 모듈성 최대화 알고리즘(Newman and Girvan, 2004)이 대표적이다. 마지막으로, 다이내믹스 기반 방법은 네트워크를 따라 움직이는 임의 보행(Random walk)의 정보 흐름을 효율적으로 압축하는 클러스터링 방법을 찾는 것으로, Infomap 알고리즘(Rosvall and Bergstrom, 2008)이 대표적이다.

본 연구에서는 다이내믹스 기반 방법 중 하나인 Infomap 알고리즘을 채택하였다. 이 방법은 상대적으로 작은 크기의 네트워크에서 높은 정확도를 보이며 네트워크의 구조적 상호 의존성을 잘 반영한다는 점에서 북한 간선도로 네트워크의 규모와 특성에 적합하다고 판단하였다. Infomap 알고리즘은 정보이론에 기반하여 임의보행(Random walk)을 통해 링크를 따라 이동할 때, 이동 경로를 최소한의 정보로 표현할 수 있는 방법을 찾는다(수식 1).

수 있으며, 후자는 네트워크의 커뮤니티 구조가 알려지지 않은 북한 도로 네트워크에 적용하기 어렵다는 한계가 있다.

이러한 문제를 고려하여, 본 연구에서는 탐지 결과의 강건성을 확보하는 접근 방식을 채택하였다. 구체적으로, 100회의 커뮤니티 탐지를 시행하고, 전체 결과 중 나머지 99개 탐지 결과와 가장 유사한 결과를 최종 탐지 결과로 채택하는 방법을 사용하였다. 이를 통해, 특정 실행에서 발생할 수 있는 우연적 변동성을 줄이고, 가장 일관된 탐지 결과를 도출할 수 있도록 하였다. 탐지 결과의 유사성은 NMI (Normalized Mutual Information)를 통해 측정된다. 이는 커뮤니티 간의 상호정보량을 정규화한 값으로, 클러스터링 결과의 유사도를 측정하는 지표이다(수식 2).

$$NMI(X, Y) = \frac{2 \cdot MI(X, Y)}{H(X) + H(Y)} \quad (\text{수식 2})$$

$$\text{where } MI(X, Y) = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x, y) \log \left[\frac{p(x, y)}{p(x) \cdot p(y)} \right]$$

X, Y : 커뮤니티 탐지 결과

$NMI(X, Y)$: 커뮤니티 탐지 결과 X 와 커뮤니티 탐지 결과 Y 의 정규화된 상호정보량

$MI(X, Y)$: 커뮤니티 탐지 결과 X 와 커뮤니티 탐지 결과 Y 의 상호정보량

$H(X), H(Y)$: 커뮤니티 탐지 결과 X (또는 Y)의 엔트로피

$p(x), p(y)$: X (또는 Y)에서 x 번째(또는 y 번째) 커뮤니티에 속하는 데이터의 확률

$p(x, y)$: X 의 x 번째 커뮤니티와 커뮤니티 탐지 결과 Y 의 y 번째 커뮤니티가 동시에 발생할 확률

가중치는 도로 용량을 기준으로 설정하였다(수식 3). 도로 용량은 도로가 수용할 수 있는 교통량의 규모를 나타내는 지표로, 이를 가중치로 활용함으로써 단순한 물리적 연결성을 넘어 교통망의 기능적 위계와 실제 통행 수요 처리 능력을 고려한 커뮤니티 구조를 탐지할 수 있다. 북한 도로 네트워크 DB에서 확보할 수 있는 정보인 차로 수와 도로 등급별 설계속도(표 3-2)를 바탕으로 가중치를 산정하였다. 도로 등급별 평지대의 기준 설계속도를 고려하여 고속도로 대비 상대적인 용량 비율을 산정하였으며, 이에 따라 1급 도로는 0.83(100/120), 2급 도로는 0.66(80/120)의 보정계수를 적용하였다.

$$w_a = l_a \cdot s_a \quad (\text{수식 3})$$

$$\text{where } v_a = \begin{cases} 1, & \text{if 도로 등급} = \text{고속도로} \\ 0.83, & \text{if 도로 등급} = \text{1급 도로} \\ 0.66, & \text{otherwise} \end{cases}$$

w_a : 링크 a 의 가중치

l_a : 링크 a 의 차로 수

v_a : 링크 a 의 설계속도 보정계수

<표 3-2> 북한 도로 설계속도 기준(공업도서출판사, 1999)

지대구분 도로등급	평지대(km/h)		구릉지대(km/h)		산악지대(km/h)	
	기준	최소	기준	최소	기준	최소
고속도로	120	100	100	80	80	60
1급	100	80	80	60	60	50
2급	80	60	60	50	50	40
3급	60	50	50	40	40	30
4급	50	40	40	30	30	25
5급	40	30	30	25	25	20
6급	30	25	25	20	25	20

마지막으로, 네트워크 내 커뮤니티의 구조적 특성을 평가하기 위해 <표 3-3>에 제시된 커뮤니티 변수를 측정하였다. 교통 네트워크에서 커뮤니티의 규모와 응집성은 각각 해당 권역의 물리적인 서비스 범위와 권역 내 및 권역 간 통행의 효율성을 의미한다. 여기에서 노드 수와 링크 수는 개별 커뮤니티의 규모를 나타낸다. 내부 연결 밀도는 커뮤니티 내 노드들이 서로 얼마나 조밀하게 연결되어 있는지, 외부 연결 밀도는 커뮤니티 내부 노드들과 커뮤니티 외부 노드들이 서로 얼마나 조밀하게 연결되어 있는지를 나타낸다.

<표 3-3> 커뮤니티 변수 정의

변수	노드 수	링크 수	내부 연결 밀도	외부 연결 밀도
산출식	V_m	E_m	$\frac{E_m^{in}}{V_m \times (V_m - 1) / 2}$	$\frac{E_m^{ex}}{V_m \times (N - V_m)}$
의미	커뮤니티 m 에 포함된 노드 개수	커뮤니티 m 에 포함된 링크 개수	커뮤니티 m 내부 노드 간의 응집성	커뮤니티 m 과 커뮤니티 외부 노드 간의 응집성

3) 다층적 연계성 평가

마지막으로, 도로 네트워크의 구조적 특성과 기능적 위계를 종합적으로 평가하기 위해 북한 도로 네트워크에 대한 다층적 연계성 분석을 수행하였다. 이는 북한의 도로 네트워크가 지형적·사회적 제약으로 인해 분절된 특성을 가지며, 단일 지표만으로는 국가 차원의 교통망 구조를 충분히 설명하기 어려운 한계가 있기 때문이다. 기존의 교통 네트워크 연구

들은 거시적 단위의 네트워크 지표를 활용하여 네트워크 전체의 특성을 평가하거나, 미시적 단위의 노드 중심성을 활용하여 개별 노드 수준의 특성을 평가하였다. 그러나 이러한 접근은 도로 네트워크의 지역적 분절성을 고려하지 못하며, 권역 간 연계 구조나 기능적 위계를 충분히 반영하기 어렵다는 한계를 가진다. 예를 들어, 특정 노드가 전체 네트워크 차원에서는 중요도가 낮게 나타날 수 있으나 개별 교통권역 내에서는 상대적으로 중요도가 높을 수 있다. 혹은, 특정 노드가 교통권역 간의 이동에서는 핵심적 역할을 하지만 교통권역 내의 이동에서는 그 중요성이 낮을 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 네트워크의 커뮤니티 구조를 고려한 다층적 연계성 평가 지표를 활용하였다. 평가 지표는 전역 연계성(C_g), 권역 간 연계성(C_{ex}), 권역 내 연계성(C_{in})의 세 가지로 구성된다. 먼저, 전역 연계성은 국가 차원에서 개별 노드의 중요도를 의미하며, 연결강도 중심성을 통해 측정한다. 그러나 북한의 경우 지형적·사회적 제약으로 인해 도로 네트워크가 분절되어 있어, 이러한 접근만으로는 지리적으로 분리된 권역 간 연결이나 교통망의 복잡성을 충분히 반영하기 어렵다.

이러한 한계를 보완하기 위해, 권역 간 연계성과 권역 내 연계성을 분석하였다. 권역 간 연계성은 북한 교통망의 광역적 연결 측면에서 각 노드의 중요도를 의미하며, Participation Coefficient (Guimera and Amaral, 2005)를 통해 측정한다. 이는 특정 노드가 다른 커뮤니티와 얼마나 고르게 연결되어 있는지를 나타내는 지표로, 이 값이 높은 노드는 권역 간의 이동에서 핵심적 역할을 수행하는 것으로 해석할 수 있다. 한편, 권역 내 연계성은 북한 교통망의 지역적 연결 측면에서 각 노드의 중요도를 의미하며 개별 교통권역을 대상으로 한 연결강도 중심성을 통해 측정한다. 이를 통해 전역 네트워크 분석에서는 두드러지지 않았으나 각 교통권역 내에서 중추적 기능을 담당하는 노드들을 식별할 수 있다.

<표 3-4> 다층적 연계성 평가 지표

변수	전역 네트워크 연계성	권역 간 네트워크 연계성	권역 내 네트워크 연계성
	$C_g(i) = \sum_{j \neq i} w(i, j)$	$C_{ex}(i m) = 1 - \sum_{m=1}^M \left(\frac{w_{i m}}{w_i} \right)^2$	$C_{in}(i m) = \sum_{j \in m} w(i, j)$
산출식	i = 분석 노드 j = 네트워크에 존재하는 노드 m = 커뮤니티 $w(i, j)$ = 노드 i 와 노드 j 를 연결하는 링크 가중치		
	w_i = 노드 i 의 연결강도 $w_{i m}$ = 노드 i 의 연결강도 중 커뮤니티 m 과의 연결강도		

3. 북한 도로 네트워크의 기능적 특성

1) 연계성

연계성 분석 결과, 평양, 남포, 개성 등 주요 도시 지역에서 높은 연계성이 확인되었다. 이는 북한이 주요 도시들을 중심으로 간선도로망을 구축하여 효율적인 연결성을 확보하고 있음을 보여준다. 특히 평양은 높은 연결강도 중심성을 보유하고 있는 것으로 나타났는데, 평양의 도로망이 체계적으로 구축되어 있으며 주요 간선도로와의 효율적 연결성을 확보하고 있음을 의미한다.

한편, 높은 연결강도 중심성을 나타내는 노드는 대부분 고속도로망에 위치한 것으로 나타났다. 이는 북한의 간선도로가 고속도로를 중심으로 발전해 왔음을 반영한다. 북한의 고속도로망은 평양을 중심으로 한 방사형 형태로 수도권과 지방 간의 연결을 강화하며, 주요 도시 사이를 연결해 국가 기간교통망으로서의 역할을 수행하는 것으로 판단된다.

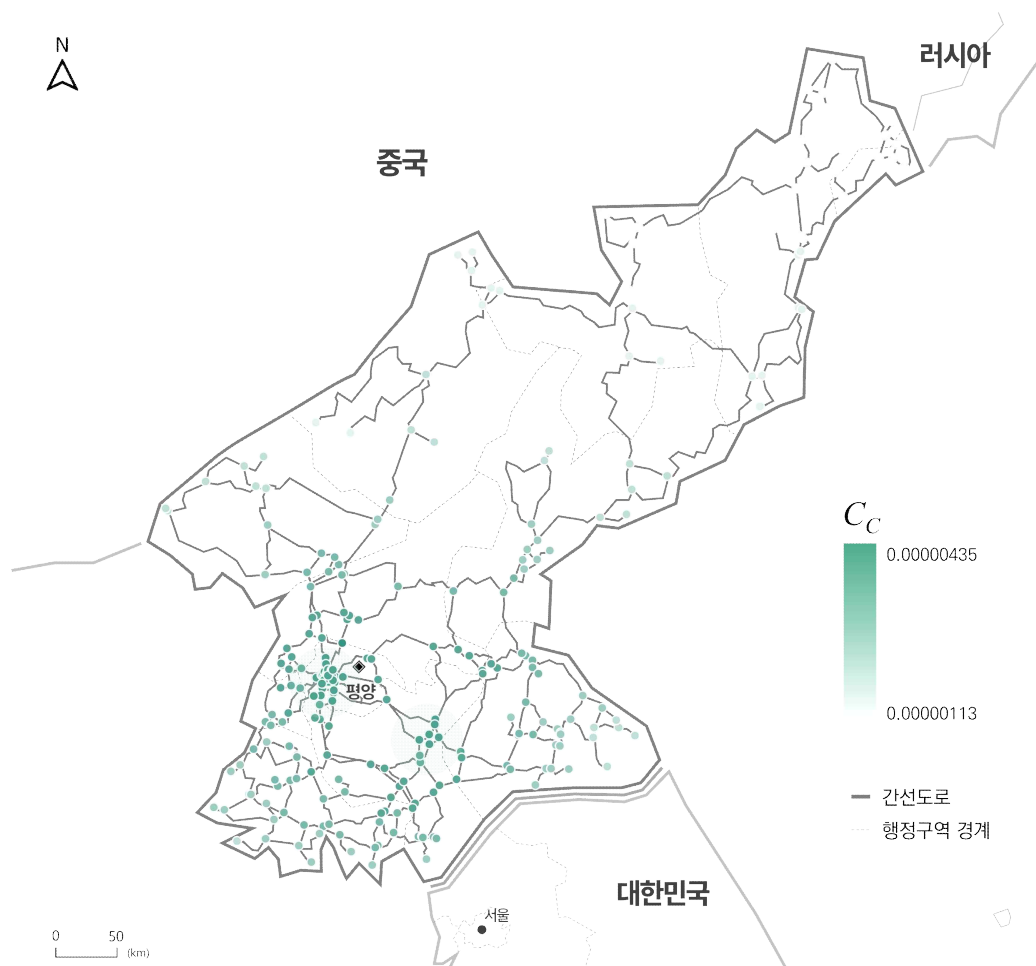


<그림 3-2> 연결강도 중심성 분석 결과

2) 접근성

북한 도로망의 접근성은 지역별로 차이를 보인다. 근접 중심성 값이 높은 노드는 주요 고속도로의 시점인 평양과 국토 남부의 중앙인 황해북도 북부에 위치한 것으로 나타났으며, 해당 노드는 타 지역으로의 접근성이 상대적으로 우수한 것으로 파악된다. 평양은 북한의 정치, 경제, 문화의 중심지이자 주요 교통망이 집중된 지역으로, 대부분의 간선도로가 이곳을 기점으로 하기에 전국적으로 이동이 용이한 구조를 형성하고 있다. 황해북도 북부는 서해안과 동해안을 연결하는 평양-원산 간 고속도로가 위치한 곳으로, 해당 지역은 서해안과 동해안을 연결하는 주요 간선도로의 중간 지점으로 서 타 지역으로의 접근성이 양호한 것으로 해석된다.

반면 양강도와 함경북도 지역은 북한 내에서도 가장 낮은 근접 중심성 값을 나타내 타 지역으로의 접근성이 열악한 것으로 평가되었다. 이는 해당 지역이 서북부의 산악지대에 위치해 있으며, 자연적 장애물이 도로망 형성에 상당한 제약을 가하기 때문으로 판단된다. 북한의 주요 도로망은 수도권을 중심으로 방사형으로 뻗어나가는 형태를 보이지만, 양강도와 함경북도 지역은 이러한 주요 교통축에서 상당히 벗어나 있어, 네트워크 내에서 상대적으로 고립된 것으로 평가된다.

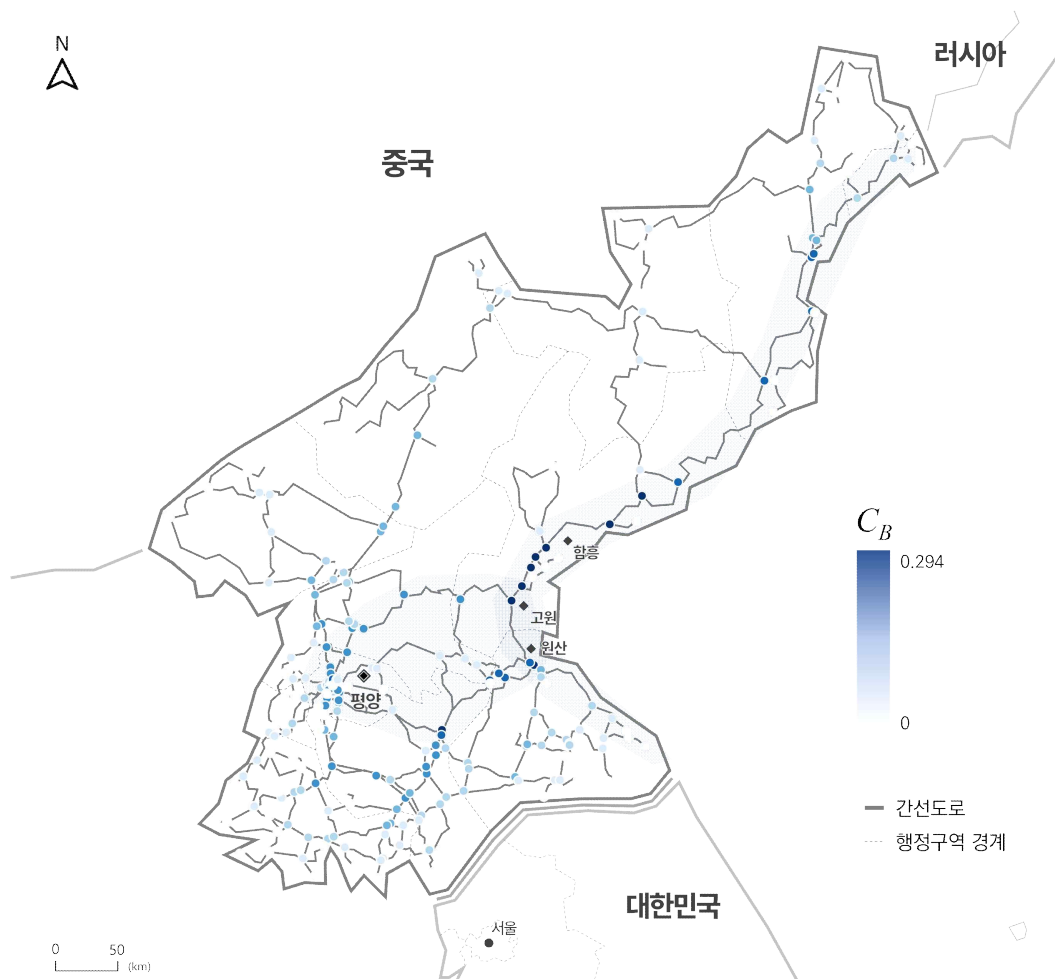


<그림 3-3> 근접 중심성 분석 결과

3) 전이성

북한 도로망의 전이성 분석 결과, 일부 특정 노드에서 높은 매개 중심성 값이 확인되었다. 특히, 원산-고원-함흥을 잇는 구간에서 가장 높은 값이 나타나 해당 노드가 높은 전이성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 해당 구간이 남포-평양-원산을 연결하는 동서축과, 고성-함흥-청진-라선을 연결하는 동해안축이 교차하는 지점이기 때문이다. 따라서 해당 구간은 수도인 평양과 동해안 공업도시, 그리고 중국·러시아 국경지대를 연결하는 전략적 중요성이 두드러진다.

한편, 높은 전이성은 지역 간 이동의 핵심 경로로서의 중요성과 동시에 대체 경로 부재로 인한 네트워크의 취약성을 시사한다. 매개 중심성이 높은 노드들은 두 개 이상의 주요 교통축을 연결하는 교차점에 위치하며, 이 지점에서 문제가 발생하면 대체 경로가 부족하여 네트워크 전체의 성능이 크게 저하될 수 있다. 따라서, 교통망의 안정성을 강화하기 위해서는 대체 경로 건설 등을 통한 도로 교통망의 중복성(redundancy) 확보가 필수적이다. 주요 교차점에 대한 보완 노선을 확충하거나 기존 도로망을 보강하는 전략을 통해, 충격에 의한 노드의 기능 상실에도 교통망이 원활하게 기능할 수 있도록 대비하여야 한다.

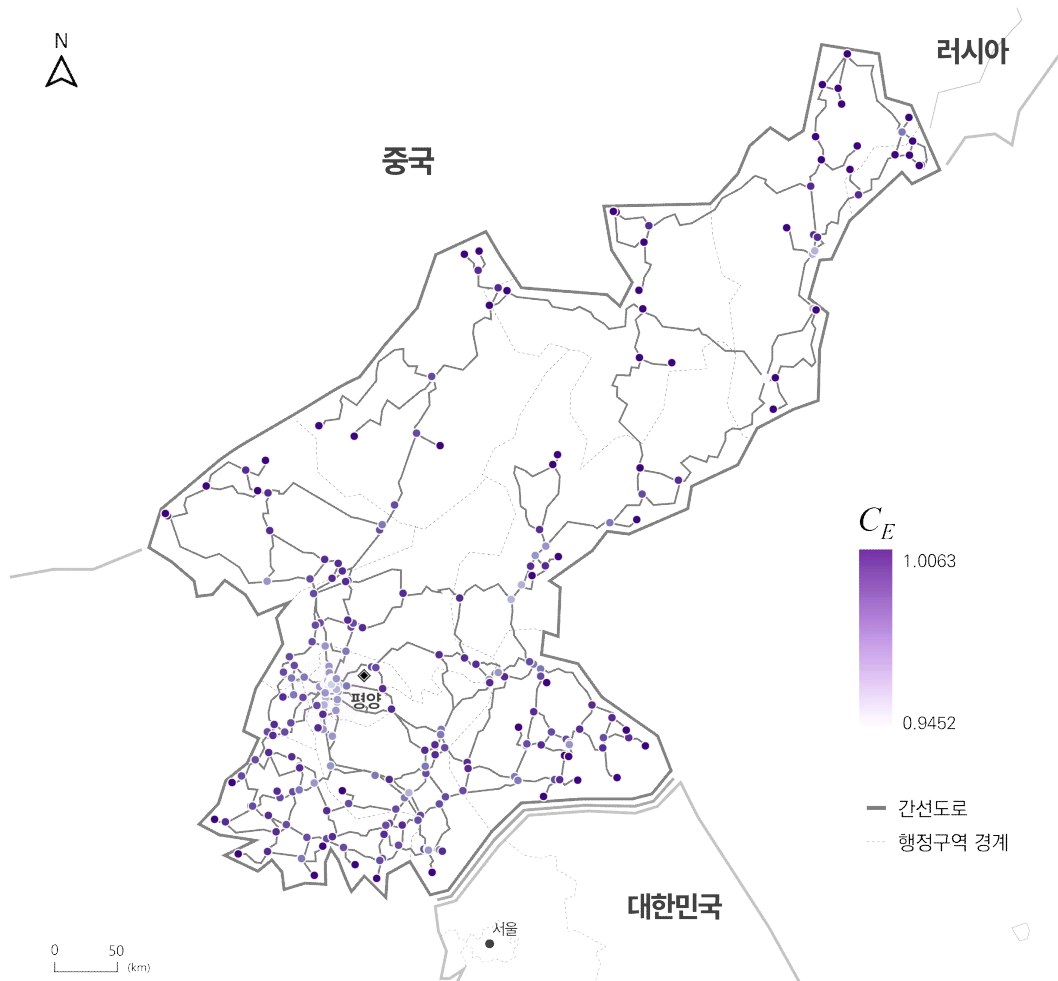


<그림 3-4> 매개 중심성 분석 결과

4) 회복성

북한 도로망의 회복성 분석 결과, 평양 중심부의 취약성이 뚜렷하게 나타난다. 특히 고속도로와 시내도로가 교차하는 지점에서 가장 낮은 효율 중심성 값이 나타났는데, 이는 해당 노드가 제거될 때 전체 교통망의 효율성이 급격히 감소함을 의미한다. 평양은 북한 내 주요 도시들과 직접적으로 연결된 간선도로가 많은데, 이 지역의 노드가 기능을 상실하면 기존의 짧은 경로들이 단절되면서 대체 경로로 우회해야 하는 경우가 증가하고, 평균 이동 거리가 길어지면서 네트워크 효율성이 감소하게 된다.

이러한 취약성은 크게 두 가지 측면에서 중요한 의미가 있다. 첫째, 평양 중심부는 도로망의 밀도가 높아 효율적인 연계성을 제공하지만, 역설적으로 이러한 고밀도 구조가 외부 충격에 대한 취약점으로 작용한다. 둘째, 해당 도로에 문제가 발생하게 되면 평양은 물론 북한 전체 교통망의 효율성이 크게 저하될 수 있다. 이는 평양이 북한의 교통망에서 핵심 허브로서 기능하고 있기 때문이다. 주요 교차점의 기능 저하는 도시 내 이동뿐만 아니라 지역 간 이동에도 심각한 지장을 초래할 수 있다는 점에서 해당 지점의 회복력 강화에 대한 전략 수립이 요구된다.

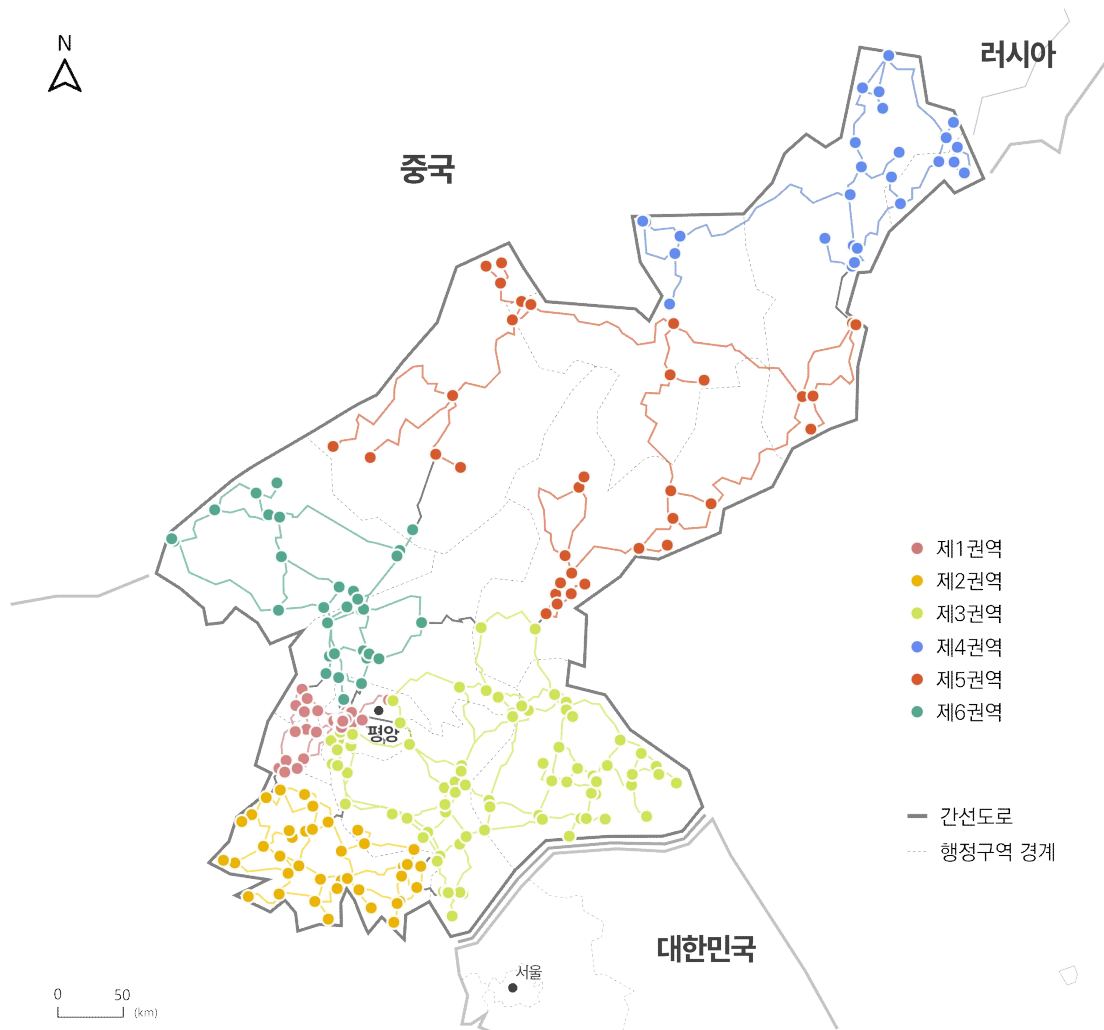


<그림 3-5> 효율 중심성 분석 결과

4. 북한 도로 교통권역 도출

1) 교통권역의 구성

커뮤니티 탐지 분석 결과, 북한의 도로 네트워크는 6개의 주요 교통권역으로 구분된다(Average NMI = 0.926). 제1권역은 북한의 수도인 평양 중심부와 주요 항구도시인 남포를 포함하며, 제2권역은 황해남도 전역을 아우른다. 제3권역은 평양 외곽과 개성, 황해북도, 강원도를 포괄하며, 제4권역은 북·중·러 접경지대인 라선특별시와 함경북도를 포함한다. 제5권역은 자강도, 양강도, 함경남도로 구성되며, 제6권역은 평양 외곽과 평안북도, 평안남도를 아우르는 것으로 나타났다.



<그림 3-6> 북한의 도로 교통권역

2) 교통권역의 특성

커뮤니티 변수를 통해 교통권역별 특성을 평가한 결과, 북한의 도로 교통권역은 공급 규모와 연결성 측면에서 뚜렷한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 공급 규모 측면에서, 평양 외곽과 개성, 황해북도, 강원도를 포괄하는 제3권역이 90개 노드와 116개 링크로 가장 큰 도로망을 보유하고 있다. 반면 평양 중심부와 남포를 포함하는 제1권역은 50개 노드와 71개 링크로 상대적으로 작은 규모지만, 북한의 정치·경제 중심지를 연결하는 핵심 교통망이다.

실질적인 공급 수준은 평균 차로 수와 총연장으로 파악할 수 있다. 수도권인 제1권역은 평균 2.59차로로 공급 수준이 가장 양호하며, 교통 수요 또한 많을 것으로 예상할 수 있다. 제3권역은 2,321km의 최장 도로 연장을 나타내지만, 평균 차로 수는 1.38로 공급 수준이 저조하다. 황해남도 전역을 아우르는 제2권역과 자강도, 양강도, 함경남도로 구성된 제5권역은 평균 1차로 수준으로, 기반 시설이 가장 낙후되어 있다.

연결성 측면에서, 라선특별시와 함경북도를 포함하는 제4권역은 0.08730의 가장 높은 내부 연결 밀도를 보이는데, 이는 북·중·러 접경지대라는 지리적 특성 때문으로 판단된다. 제1권역도 0.05795로 높은 내부 연결 밀도를 유지하여 수도권 내 도시 간 연결이 긴밀함을 보여준다. 반면 제3권역은 0.02896으로 내부 연결 밀도가 낮는데, 광범위한 지역을 아우르는 만큼 도로망이 분산되기 때문으로 해석된다. 외부 연결 밀도는 전 권역에서 0.00014~0.00086의 낮은 수준을 보여 북한 도로망이 내부 중심으로 구축되어 있음을 시사한다. 다만, 평양과 남포를 포괄하는 제1권역은 비교적 높은 값을 보여 수도권으로서 다른 교통권역과의 연결이 상대적으로 원활함을 알 수 있다.

<표 3-2> 교통권역별 특성

교통권역	노드 수(개)	링크 수(개)	평균 차로 수(개)	총연장(km)	내부 연결 밀도	외부 연결 밀도
제1권역 (평양·남포)	50	71	2.59	397	0.05795	0.00086
제2권역 (황해남도)	43	54	1	947	0.05980	0.00048
제3권역 (개성·황해북도·강원도)	90	116	1.38	2,321	0.02896	0.00063
제4권역 (라선·함경북도)	28	33	1.24	941	0.08730	0.00014
제5권역 (자강도·양강도·함경남도)	36	42	1.02	1,987	0.06666	0.00033
제6권역 (평안남·북도)	35	47	1.51	1,226	0.07899	0.00069

5. 북한 도로 네트워크의 다층적 연계성

북한 도로 네트워크의 다층적 연계성을 파악하기 위하여, 전역 연계성, 권역 내 연계성, 권역 간 연계성을 살펴본다. 연계성 지수가 높은 노드는 북한 도로 네트워크에서 중요한 역할을 수행하는 노드로 이해할 수 있다. 다만 지수의 절대값이 얼마나 커야 중요한 노드인지 특정하기 어렵다. 본 연구는 절대값 대신 연계성 지수 상위 노드를 중요한 노드로 보았다. 연계성 지수 상위 5%, 10%, 30% 노드들의 위치를 파악한 결과, 전반적으로 유사한 공간 분포를 나타냈다. 이에 본 절에서는 지면의 한계를 고려하여, 연계성 지수 상위 5%를 기준으로 다층적 연계성을 분석한다. 다만 상위 지수 노드들의 공간적 분포를 이해할 수 있도록 상위 30% 노드까지를 그림에 도시한다.

1) 전역 연계성

전역 연계성 분석을 통해 북한 기간교통망의 핵심 교통축을 식별할 수 있었다. 분석 결과, 평양직할시의 146번 노드가 최고 수준의 전역 연계성($C_g = 12.6$)을 보였으며, 같은 지역 내 219번, 221번 노드($C_g = 9.96$) 또한 높은 연계성을 나타냈다. 이어서 개성특급시 154번 노드와 황해북도 황주군 148번 노드, 서흥군 220번 노드 또한 높은 연계성($C_g = 8.64$)을 나타냈다. 이들 노드는 평양-개성 고속도로와 평양-향산 고속도로에 위치하는데, 이는 평양을 중심으로 남북을 연결하는 두 고속도로가 북한 기간교통망의 중추적 기능을 담당하고 있음을 시사한다. 한편, 언급된 두 고속도로 이외의 고속도로에서도 연계성 상위 노드를 식별할 수 있었다. 이는 북한의 교통체계가 평양을 중심으로 한 고속도로망을 통해 전국의 주요 거점을 연결하는 방식으로 구축되어 있음을 시사한다.

주목할 만한 특징은 교통망의 지역적 불균형이다. 전역 연계성이 높은 노드들이 대부분 국토 남서부에 집중되어 있는데, 이는 고속도로를 중심으로 한 기간교통망이 평양과 그 인접 지역을 중심으로 발달했기 때문이다. 이러한 불균형적 교통체계는 국토 공간상의 접근성 격차를 심화시키는 요인으로 작용할 수 있다. 특히 북동부 지역의 경우, 고속도로망이 부재하고 전역 연계성이 높은 노드가 존재하지 않아 교통 서비스 수준이 상대적으로 열악할 것으로 판단된다. 이는 북한의 교통체계가 평양을 중심으로 한 고속도로 중심의 남서부권과 저차 도로망에 의존하는 북동부권으로 이원화되어 있으며, 이러한 교통 기반시설의 공간 격차가 지역 불균형의 주요 요인으로 작용할 수 있음을 시사한다.



<그림 3-7> 전역 연계성 평가 결과

<표 3-5> 전역 연계성 상위 5% 노드 목록

순위	행정구역	노드 번호	C_g
1	평양직할시	n146	12.6
2	평양직할시	n219	9.96
2	평양직할시	n221	9.96
4	평양직할시	n212	9.77
5	평양직할시	n218	9.3
6	평양직할시	n136	9
7	평양직할시	n217	8.79
8	개성특급시	n154	8.64
9	평양직할시	n216	8.62

10	황해북도 황주군	n142	8.49
10	황해북도 서흥군	n148	8.49
10	평양직할시	n220	8.49
13	평양직할시	n200	8.43
14	평양직할시	n181	7.98
14	평양직할시	n209	7.98

2) 권역 간 연계성

권역 간 연계성 분석을 통해 북한 지역 간 교통망의 주요 결절점과 그 취약성을 파악할 수 있었다. 평양직할시의 205번 노드($C_{ex} = 0.499$)와 213번 노드($C_{ex} = 0.476$)가 가장 높은 연계성을 보여, 평양이 지역 간 교통망의 핵심 결절점으로 기능하고 있음을 확인하였다. 이어서 자강도 전천군 19번 노드, 함경남도 정평군 68번 노드, 금야군 51번 노드, 평양직할시 282번 노드가 $C_{ex} = 0.459535$ 로 높은 연계성을 나타냈다.

이들 노드의 분포는 북한의 주요 지역 간 교통축 체계를 보여준다. 북부 국경축(신의주-라선)과 평양을 연결하는 향산-강계 간 1급 도로, 동서 연결축(남포-평양-원산)과 동해안축(고성-함흥-청진-라선)을 연결하는 북창-금야 간 2급 도로, 금야-정평 간 2급 도로가 권역 간 연계에서 핵심적인 역할을 수행하고 있다. 특히 이들 노드는 서로 다른 교통권역을 연결하는 2급 도로의 교차점에 위치하여, 지방 간선도로망의 주요 결절점으로 기능한다.

그러나 이러한 지역 간 교통체계는 구조적 취약성을 내포하고 있다. 권역 간 연계성이 높은 노드들이 주로 왕복 2차 도로로 구성된 2급 도로의 교차점에 위치하고 있어, 도로 용량이 제한적이기 때문이다. 또한, 도로의 포장 상태와 기하구조 등이 열악하여 실제 통행 용량은 더욱 제한될 것으로 예상된다. 이들 노드가 서로 다른 교통권역의 접점에 위치한다는 점을 고려할 때, 장래 교통 수요가 증가하면 지역 간 교통망의 심각한 병목지점으로 작용할 가능성이 높다. 이렇듯 북한의 권역 간 교통체계는 평양 중심의 고속도로망에, 그 외 지역의 연계는 취약한 2급 도로망에 의존하고 있다.



<그림 3-8> 권역 간 연계성 평가 결과

<표 3-6> 권역 간 연계성 상위 5% 노드 목록

순위	행정구역	노드 번호	C_{ex}
1	평양직할시	n205	0.499
2	평양직할시	n213	0.476
3	자강도 전천군	n19	0.459
3	함경남도 정평군	n68	0.459
3	함경남도 금야군	n51	0.459
3	평양직할시	n282	0.459
7	평양직할시	n220	0.456
8	평양직할시	n4	0.444
8	평양직할시	n7	0.444
8	평양직할시	n136	0.444

8	평양직할시	n207	0.444
8	함경북도 어랑군	n106	0.444
8	황해남도 은율군	n41	0.444
8	황해남도 봉천군	n26	0.444
8	황해남도 봉천군	n11	0.444
8	황해남도 배천군	n29	0.444
8	황해남도 사리원시	n188	0.444
8	함경남도 요덕군	n15	0.444
8	평안남도 평원군	n168	0.444

3) 권역 내 연계성

권역 내 연계성 분석 결과, C_{in} 지수 상위 노드를 통해 각 권역 내에서 중요한 역할을 수행하는 노드들을 식별할 수 있었다. 제1권역은 평양직할시를 중심으로 한 고속도로 중심의 교통체계가 구축되어 있다. 특히 평양-개성, 평양-항산을 연결하는 고속도로의 시점(146번, 219번, 221번 노드)이 높은 연계성을 보여, 권역 내 교통망의 핵심 결절점으로 기능하고 있다. 이들 노드는 전역 연계성 분석에서도 최상위 값을 기록하여, 단일 교통권역을 넘어 국가 차원의 교통망에서도 중추적 역할을 수행하고 있다.

제2권역은 고속도로가 부재한 대신 1급 도로 중심의 교통체계가 형성되어 있다. 재령군 179번 노드($C_{in} = 2.81$)와 벽성군 160번 노드($C_{in} = 3.32$)이 사리원-해주, 안악-벽성을 잇는 1급 도로의 주요 교차점으로서 도내 교통의 중심축을 형성하고 있다. 이들은 다른 권역의 핵심 노드들에 비해 낮은 수치를 나타냈지만, 해당 교통권역 내에서는 중요한 교차점으로 기능한다. 황해남도는 평야 지대임에도 불구하고 고속도로가 통과하지 않으나, 1급 도로를 중심으로 한 격자형 도로망이 권역 내 이동을 지원하고 있다.

제3권역은 평양-개성 고속도로가 권역의 핵심 교통축을 이루고 있다. 평양직할시의 136번 노드가 $C_{in} = 9.00$ 으로 주요 노드로 부각되며, 개성특급시의 154번 노드($C_{in} = 8.64$), 황해북도 황주군과 서흥군의 142번 및 148번 노드($C_{in} = 8.49$)가 주요 결절점으로 기능한다. 반면, 동일한 권역을 통과하는 평양-원산 고속도로는 권역 내 연계성 측면에서는 상대적으로 그 중요성이 낮은 것으로 나타났다. 이는 북한의 간선도로망이 동서 연결보다는 서해안의 남북 연결축에 우선순위를 두고 발전하였음을 시사한다.

제4권역과 제5권역은 하위 위계 도로 중심의 교통체계가 특징적이다. 제4권역의 청진시의 110번 노드($C_{in} = 4.98$)는 원산-라선 1급 도로에서 청진-회령 1급 도로가 분기되는 지점으로, 함경북도 내 도로망의 중요한 교차점으로 기능한다. 제5권역의 길주군 104번 노드($C_{in} = 3.98$)는 원산-라선 1급 도로와 길주-혜산 2급 도로의 교차점으로 각각 기능하며 동해안축과 북부 국경축을 연결하는 중요 거점 역할을 수행한다. 이들 두 권역의 핵심 노드는 다른 권

역의 핵심 노드들에 비해 낮은 수치를 나타냈지만, 해당 교통권역 내에서는 중요한 교차점으로 기능하기에 주목이 필요하다. 두 권역 모두 산악지형으로 인한 제약이 존재해 하위 위계의 도로를 중심으로 한 교통체계가 지역 간 연결성을 보완하고 있는 것으로 해석된다.

제6권역의 교통체계는 세 개의 주요 교통축이 교차하는 특징을 보인다. 평양직할시 209번 노드($C_{in} = 7.98$)를 중심으로 평양-향산 고속도로, 평양-신의주 1급 도로, 평양-원산 1급 도로가 각각 북부 내륙축, 서해안축, 동서 연결축을 형성하고 있다. 특히 권역 내 연계성이 높은 노드들이 평양-향산 고속도로 상에 집중적으로 분포하는 것으로 보아, 이 고속도로가 평안도 지역의 핵심 교통축으로 기능하고 있음을 알 수 있다. 이들 주요 노드는 세 교통축의 교차점에 위치하여 권역 내 교통망의 결절점 역할을 수행하며, 이는 제6권역이 북한 서부 교통망의 중추적 기능을 담당하고 있음을 시사한다.



<그림 3-9> 권역 내 연계성 평가 결과

<표 3-7> 권역 내 연계성 상위 5% 노드 목록

교통권역	행정구역	노드 번호	C_{in}
제1권역	평양직할시	n146	12.6
제1권역	평양직할시	n219	9.96
제1권역	평양직할시	n221	9.96
제2권역	황해남도 재령군	n179	2.81
제2권역	황해남도 벽성군	n160	3.32
제3권역	평양직할시	n136	9.00
제3권역	개성특급시	n154	8.64
제3권역	황해북도 황주군	n142	8.49
제3권역	황해북도 서흥군	n148	8.49
제3권역	개성특급시	n209	7.94
제4권역	함경북도 청진시	n110	4.98
제5권역	함경북도 길주군	n104	3.98
제6권역	평양직할시	n209	7.98

4) 소결

이러한 분석 결과는 다음과 같은 사실을 시사한다. 먼저, 평양은 북한 도로 네트워크의 핵심 허브로 기능하며, 전역 연계성, 권역 내 및 권역 간 연계성 지수 모두에서 상위 순위를 기록한 노드들이 평양에 집중되어 있음을 알 수 있었다. 즉, 평양은 북한 도로교통의 핵심을 형성하는 방사형 고속도로의 중심지로서, 주요 이동성과 연결성을 제공하고 있다. 이러한 결과는 평양을 중심으로 한 교통 거점의 효율적 관리가 북한 전체 도로 네트워크의 안정성과 효율성을 유지하는데 핵심적이라는 점을 시사한다.

다음으로, 동일한 네트워크 내에서도 계층에 따라 중요한 노드가 다른 것으로 나타났다. 전역 연계성 측면에서는 평양을 중심으로 한 고속도로망, 특히 평양-개성과 평양-향산 고속도로가 북한 기간교통망의 중추적 기능을 담당하고 있었다. 권역 간 연계성 측면에서는 평양 지역과 함께 북동부와 남서부를 매개하는 지점의 노드들이 지역 간 교통망의 주요 결절점으로 기능하고 있었다. 권역 내 연계성 분석 결과, 권역별 도로 네트워크의 특성에 따라 각 권역 내에서 중요한 역할을 수행하는 노드가 결정되는 것으로 나타났다.

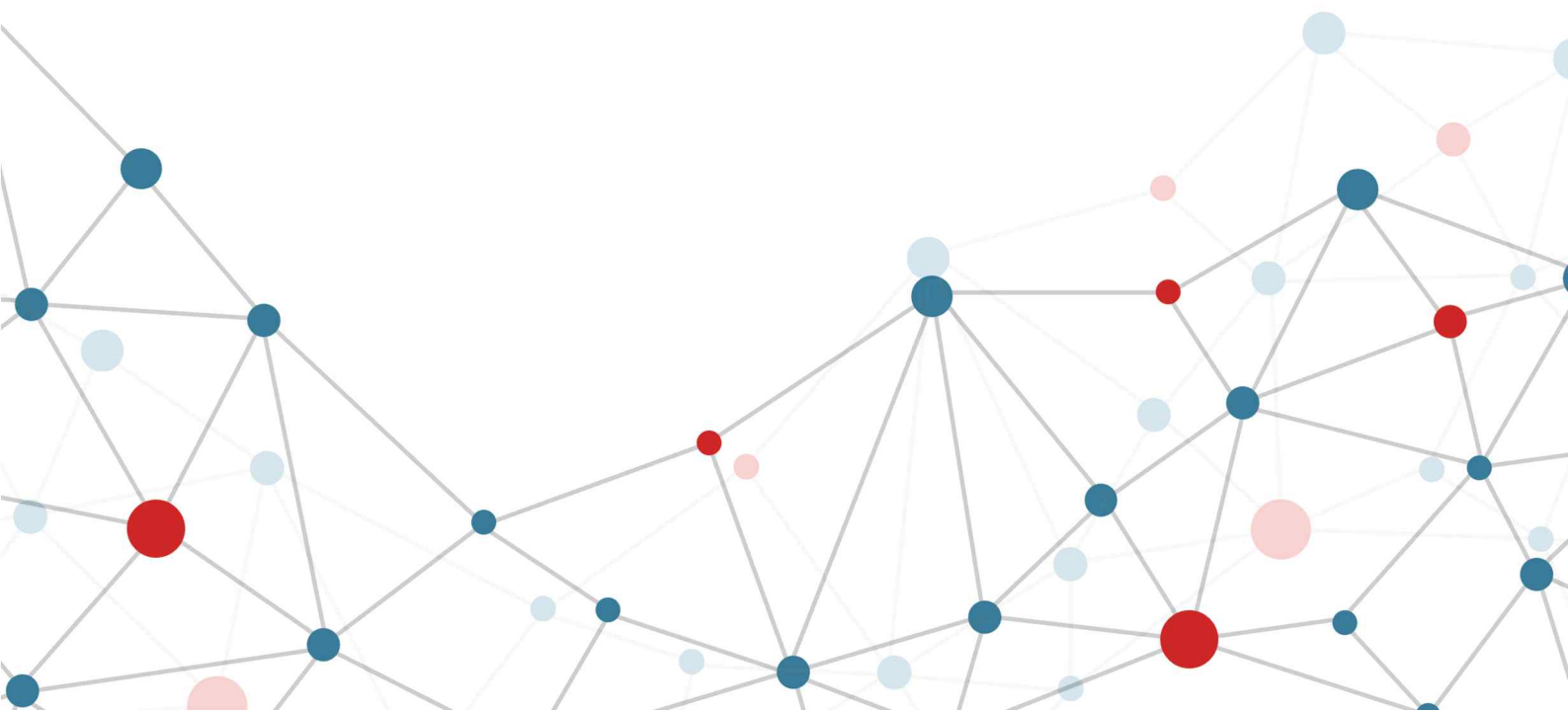
마지막으로, 북한 도로 네트워크의 권역 간 연계성을 지원하는 주요 결절점은 병목 현상의 발생 가능성이 높아 주의가 필요하다. 평양 이외에도 북부 국경축(신의주-라선)과 평양을 연결하는 향산-강계 간 1급 도로, 동서 연결축(남포-평양-원산)과 동해안축(고성-함흥-청진-라선)을 연결하는 북창-금야 간 2급 도로, 금야-정평 간 2급 도로가 특히 중요한 것으로 나타났는데, 이는 해당 구간이 네트워크의 연결성을 좌우하는 역할을 수행할 수 있음을 보여준다. 그러나 이러한 노드들은 주로 2급 도로와 같은 하위 위계 도로망에 위치하며, 도로 용량과 기하구조의 한계로 인해 병목 현상이

발생할 가능성이 높다. 따라서 외곽 지역의 주요 결절점에 대한 도로의 질적 개선 및 교통량 분산 전략이 필요하며, 이러한 노력은 권역 간 이동성을 강화하고 병목 현상을 완화하는 데 기여할 수 있다.

제4장

결론

1. 연구의 의의와 한계
2. 향후 연구 방향



1. 연구의 의의

본 연구는 북한의 도로교통 체계에 대한 정량적 분석을 시도하였다. 북한의 철도 중심 교통체계가 약화되고 도로 중심의 교통체계가 성장하고 있는 상황에서, 기존에 제안된 통일 한반도 교통망 구상의 재검토가 필요한 실정이다. 이에 본 연구는 접근 가능한 문헌정보, 공간정보, 위성영상정보를 활용하여 북한 도로교통 네트워크 데이터베이스를 구축하고, 네트워크 이론을 적용하여 그 특성을 분석하였다.

먼저, 교통분석용 북한 도로 네트워크 구축 과정은 크게 GIS DB 구축과 교통분석용 네트워크 구축으로 구분되며 각 네 가지 쟁점이 도출되었다. 네트워크 분석 시 발생할 수 있는 왜곡 및 정보 부족 문제를 없애기 위해 위성영상을 보조 자료로 활용하였으며, 각 쟁점에 따른 대안을 제시하였다. 다음으로, 북한 도로교통 공급체계에 관한 네트워크 분석 결과, 북한의 도로 네트워크는 6개의 주요 교통권역으로 구분되며, 권역 내, 권역 간, 전역 네트워크의 연계성 측면에서 중요한 지점이 서로 다른 것으로 나타났다. 이와 같이 다층적 연계성 분석을 통해 평양 중심의 중앙 집중화 경향, 지역 간 이동성을 지원하는 매개 지점의 분포, 그리고 국지적 이동성을 지원하는 권역 중심지를 확인할 수 있었으며, 이는 분절된 네트워크에 대한 효과적인 분석 방법론이 될 수 있다.

2. 연구의 한계 및 향후 과제

본 연구에서는 접근이 제한된 북한 지역의 도로 네트워크 구축 방법론을 제시하고, 교통분석에 적합한 실용적인 데이터베이스를 구축하였다. 그리고 구축된 데이터베이스를 바탕으로 네트워크 이론을 활용하여 북한 도로 네트워크의 공급 체계를 분석하여 통일 한반도 교통망 구상에 필요한 중요한 시사점을 제공하였다. 그러나, 본 연구에서 구축된 네트워크는 간선도로에 초점을 맞추고 있으므로 향후 지선도로까지 포함하는 네트워크 구축으로 확장될 필요가 있다. 또한, 본 연구는 도로 네트워크의 양적, 질적 공급 특성 분석에 집중하였기 때문에, 교통체계의 또 다른 핵심 요소인 교통 수요에 대한 종합적인 분석과 이해가 부족하였다는 한계가 존재한다.

이에, 두 가지 향후 연구 방향을 제안하고자 한다. 먼저, 본 연구에서 구축된 자료를 기존의 남한 지역 도로 네트워크 자료와 통합하는 방법론을 개발할 필요가 있다. 이는 남북한 통합 교통망 계획 수립에 중요한 시사점을 제공할 것이다. 다음으로, 북한 간선도로 네트워크의 교통량을 추정하여 북한의 교통 수요를 체계적으로 분석하여야 한다. 이를 통해 한반도 남북 통합 교통망 계획 수립 시 실질적인 교통 수요를 반영한 전략을 마련할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 공업도서출판사, 『운수건설총서』, 1999.
- 교육도서출판사, 『조선지리지전서(운수지리)』, 1988.
- 교육도서출판사, “도로리정도”, 2017.
- 권영인, “북한의 도로체계 분석 및 수치지도 작성방안 연구”, 한국교통연구원 연구정책세미나, 2005, pp. 1-144.
- 김성민·서장원·오명찬·양아란·송재준·박형동, “북한 광물자원 교류를 위한 GIS 기반의 북한 교통 인프라 네트워크 분석”, 한국자원공학회지, 57(2), 2020, pp. 159-167.
- 김연규·안병민·이선영, 남북한 교통망 연결을 위한 기초조사, 교통개발연구원, 2000.
- 김인현, “북한 지역 도로 네트워크 구축 방안” 대한교통학회 학술대회지, 48, 2005. pp. 707-712.
- 김철민, “빅데이터를 활용한 북한 도로 인프라 특성 분석”. 한국지역개발학회지, 32(1), 2020, pp. 27-45.
- 남성욱·황주희, “북한의 도로정책과 남북협력 시사점”, 입법과 정책, 11(2), 국회입법조사처, 2019, pp. 101-148.
- 남정희, “북한도로 현황”, 한국도로학회지: 도로, 19(1), 2017, pp. 9-14.
- 백승걸, “북한 간선교통망 및 고속도로망 구축 전략”, 한국도로학회지: 도로, 19(1), 2017, pp. 15-24.
- 백승걸·안재영, “북한의 교통은 어떻게 진화하고 있는가?”, 한국도로공사 도로교통연구원, 2022.
- 백승걸, 정소영, 홍상연, 강정규, 이영수. (2017). 북한교통망에서 고속도로의 역할 및 구축효과 산정. 한국도로공사 도로교통연구원 연구보고서.
- 사공호상·서기환·한선희, “북한지역 국토이용 DB 구축 연구”, 한국 GIS 학회지, 15(3), 2007, pp. 323-333.
- 서종원, “남북 도로교통분야 기준의 비교 및 시사점”, KDI 북한경제리뷰, 24(3), 한국개발연구원, 2022, pp. 59-66.
- 서종원·노홍승·이호·채찬들·임서현·오성열·최성원·손정웅·계동민·김주영, 『교통물류분야 남북협력 구상』, 한국교통연구원, 2019.
- 이성수, “북한의 도로망 실태와 과제-북한 연구회 정기세미나”, 국토, 2005, pp. 120-123.
- 안병민, 『교과서에 안 나오는 북한의 교통 이야기』, 통일부 통일교육원, 2014.
- 안병민, 『통일 준비 한반도 교통인프라 구축전략 기획 연구』, 한국교통연구원, 2014.
- 장석명, “남북한 도로설계기준 비교 및 적용방안”, 한국도로학회지: 도로, 16(3), 2014, pp. 41-47.
- 통일부, 『북한 경제사회 실태 인식보고서』, 2024.

- 한국교통연구원, 『동북아북한교통자료집 - 북한 도로교통 -』, 2019.
- 홍일영, “오픈스트리트맵을 이용한 북한 도시의 도로망 네트워크 분석”, 한국지도학회지, 24(1), 2024, pp. 33-43.
- KDB 산업은행, 『2020 북한의 산업 I』, 2020.
- Bonacich, P. (1987). Power and centrality: A family of measures. *American journal of sociology*, 92(5), 1170-1182.
- Borgatti, S. P. (1997). Structural holes: Unpacking Burt's redundancy measures. *Connections*, 20(1), 35-38.
- Brin, S., & Page, L. (1998). The anatomy of a large-scale hypertextual web search engine. *Computer networks and ISDN systems*, 30(1-7), 107-117.
- Chan, H. Y., Ma, H., & Zhou, J. (2024). Resilience of socio-technical transportation systems: A demand-driven community detection in human mobility structures. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 190, 104244.
- Chang, J. S., & Kim, S. (2022). Node centrality of North Korean Railways. *Transportation Planning and Technology*, 45(7), 573-587.
- Dangalchev, C. (2006). Residual closeness in networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 365(2), 556-564.
- Derrible, S., & Kennedy, C. (2011). Applications of graph theory and network science to transit network design. *Transport reviews*, 31(4), 495-519.
- Fortunato, S., & Hric, D. (2016). Community detection in networks: A user guide. *Physics reports*, 659, 1-44.
- Freeman, L. C., Borgatti, S. P., & White, D. R. (1991). Centrality in valued graphs: A measure of betweenness based on network flow. *Social networks*, 13(2), 141-154.
- Freeman, L. C. (2002). Centrality in social networks: Conceptual clarification. *Social network: critical concepts in sociology*. Londres: Routledge, 1, 238-263.
- Galvan, G., & Agarwal, J. (2018). Community detection in action: Identification of critical elements in infrastructure networks. *Journal of Infrastructure Systems*, 24(1), 04017046.
- Guimera, R., & Amaral, L. A. N. (2004). Modeling the world-wide airport network. *The European Physical Journal B*, 38, 381-385.
- Haritha, P. C., & Anjaneyulu, M. V. L. R. (2024). Comparison of topological functionality-based resilience metrics using link criticality. *Reliability Engineering & System Safety*, 243, 109881.
- Holland, P. W., Laskey, K. B., & Leinhardt, S. (1983). Stochastic blockmodels: First steps. *Social networks*, 5(2), 109-137.

- Hong, Y., & Yao, Y. (2019). Hierarchical community detection and functional area identification with OSM roads and complex graph theory. *International Journal of Geographical Information Science*, 33(8), 1569-1587.
- Jafino, B. A., Kwakkel, J., & Verbraeck, A. (2020). Transport network criticality metrics: a comparative analysis and a guideline for selection. *Transport Reviews*, 40(2), 241-264.
- Kearney, S. P., Coops, N. C., Sethi, S., & Stenhouse, G. B. (2020). Maintaining accurate, current, rural road network data: An extraction and updating routine using RapidEye, participatory GIS and deep learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 87, 102031.
- Kim, M., Kwak, T., Jung, J., & Kim, Y. (2021). Mapping Inaccessible Areas Using Deep Learning Based Semantic Segmentation of VHR Satellite Images with Openstreetmap Data. *International Symposium on Remote Sensing*.
- Li, J., Zheng, P., & Zhang, W. (2020). Identifying the spatial distribution of public transportation trips by node and community characteristics. *Transportation Planning and Technology*, 43(3), 325-340.
- Lian, R., Wang, W., Mustafa, N., & Huang, L. (2020). Road extraction methods in high-resolution remote sensing images: A comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5489-5507.
- Lin, J., & Ban, Y. (2013). Complex network topology of transportation systems. *Transport reviews*, 33(6), 658-685.
- Newman, M. E., & Girvan, M. (2004). Finding and evaluating community structure in networks. *Physical review E*, 69(2), 026113.
- Reza, S., Ferreira, M. C., Machado, J. J., & Tavares, J. M. R. (2024). Road networks structure analysis: A preliminary network science-based approach. *Annals of mathematics and artificial intelligence*, 92(1), 215-234.
- Rosvall, M., & Bergstrom, C. T. (2008). Maps of random walks on complex networks reveal community structure. *Proceedings of the national academy of sciences*, 105(4), 1118-1123.
- Strano, E., Viana, M. P., Sorichetta, A., & Tatem, A. J. (2018). Mapping road network communities for guiding disease surveillance and control strategies. *Scientific reports*, 8(1), 4744.
- Wan, Z., Mahajan, Y., Kang, B. W., Moore, T. J., & Cho, J. H. (2021). A survey on centrality metrics and their network resilience analysis. *IEEE Access*, 9, 104773-104819.

- Wang, S., Du, Y., & Deng, Y. (2017). A new measure of identifying influential nodes: Efficiency centrality. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 47, 151-163.
- Wang, F., & Xu, Y. (2011). Estimating O-D travel time matrix by Google Maps API: implementation, advantages, and implications. *Annals of GIS*, 17(4), 199-209.
- Wei, S., & Wang, L. (2023). Community detection, road importance assessment, and urban function pattern recognition: A big data approach. *Journal of Spatial Science*, 68(1), 23-43.
- Yang, C., & Wang, Z. (2020). An ensemble Wasserstein generative adversarial network method for road extraction from high resolution remote sensing images in rural areas. *Ieee Access*, 8, 174317-174324.
- Zhang, Y., Li, X., Wang, A., Bao, T., & Tian, S. (2015). Density and diversity of OpenStreetMap road networks in China. *Journal of Urban Management*, 4(2), 135-146.

