



남북한 통합 철도망의 링크 중요도 및 연결 신뢰성 평가



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

< 연구진 >

▣ 남북한 통합 철도망의 링크 중요도 및 연결 신뢰성 평가

연구책임자 : 장 수 은 서울대학교 환경계획학과 교수

연구진 : 정 동 재 서울대학교 환경계획연구소 객원연구원

2020년도 서울대학교 통일평화연구원의 재원으로 통일기반구축사업의 지원을 받아 수행된 결과물임.

목 차

사업 요약	1
제1장 서론	11
제1절 연구 배경	11
제2절 연구 목적	13
제2장 자료 구축	14
제1절 남북한 통합 철도망	14
제2절 통행수요	16
제3장 연구 방법론	17
제1절 정의	17
제2절 측정 방법	18
제4장 분석결과	21
제1절 링크 치명도	21
제2절 연결 신뢰성	24
제5장 결론	32
참고 문헌	33

결과보고서 요약

사업기관	서울대학교 환경계획연구소		
사업명	남북한 통합 철도망의 링크 중요도 및 연결 신뢰성 평가		
사업책임자	성명	소속	직위
	장수은	환경계획학과	정교수
사업기간	2020.3.1.~2021.1.31	사업비	
<p>1. 사업 목적</p> <ul style="list-style-type: none"> - 본 사업의 목적은 다음과 같이 크게 세 가지임 - 첫째, 남북한 통합 철도망에서 링크 치명도를 평가하고 주요 링크를 식별하는 것 - 둘째, 남북한 통합 철도망의 연결 신뢰성을 평가하는 것 - 셋째, 통일을 대비하여 남북한 철도망 연결사업의 링크 치명도 완화효과 및 연결 신뢰성 제고효과를 평가하는 것 <p>2. 사업 내용</p> <ul style="list-style-type: none"> - 남북한 통합 철도망 분석DB 구축 - 링크 치명도, 연결 신뢰성, 링크 치명도 완화효과, 연결 신뢰성 제고 효과 평가지표 및 방법론 개발 - 남북한 통합 철도망의 링크 치명도 및 연결 신뢰성 평가 - 남북한 철도망 연결 노선의 링크 치명도 완화효과 및 연결 신뢰성 제고 효과 평가 <p>3. 사업 성과</p> <ul style="list-style-type: none"> - 국외 학술 발표 1건 - 국내 학술 발표 2건 - 우수논문발표상 수여 - 북한철도망DB 구축 			

서울대학교 환경계획연구소

1. 사업 배경

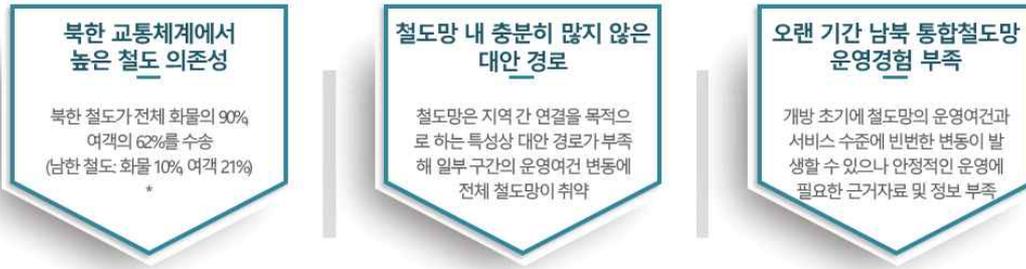
□ 개요

- 사업명: 남북한 통합 철도망의 링크 중요도 및 연결 신뢰성 평가
- 기관명: 서울대학교 환경계획연구소

□ 추진 배경 및 목적

- 추진배경
 - 북한에서 철도는 전체 화물의 90%, 여객의 62%를 수송하는 중요한 교통수단으로 남북한 교류를 위한 초기 단계에서 남북한의 통합 철도망의 역할이 중요할 것으로 예상됨
 - 그러나 남북한 통합 철도망은 오랜기간 공동으로 운영된 경험이 없을 뿐만 아니라, 주요 기종점간을 연결하는 철도망의 특성상 대안경로가 부족하기 때문에 일부 구간의 운영 여건 변동으로 인해 전체 철도망의 서비스 수준이 영향을 받을 수 있음
 - 단지 남북한 철도망을 연결하는 것에 그치지 않고 여러 돌발상황에서도 남북지역간 교류를 정상 수준으로 지속할 수 있는, 즉 돌발상황에 취약하지 않은 남북한 통합 철도망 계획이 필요함
 - 따라서 통일 이후 나타날 수 있는 장·단기적 교통체계의 변동성에 효율적으로 대비하기 위하여 남북한 통합 철도망을 구성하는 개별 링크의 치명도와 연결 신뢰성에 관한 정보가 요구됨

남북한 철도망 취약성 관리의 중요성



개방 이후 나타날 수 있는 철도망의 장·단기적 변동성에 효과적으로 대비하기 위하여

1. 남북한 통합 철도망 내 **링크의 치명도**와 전체 철도망의 **연결 신뢰성**에 관한 정보 필요
2. 남북한 통합 철도망의 취약성(vulnerability)을 낮추기 위한 장래 **철도사업 평가기준** 필요

○ 사업목적

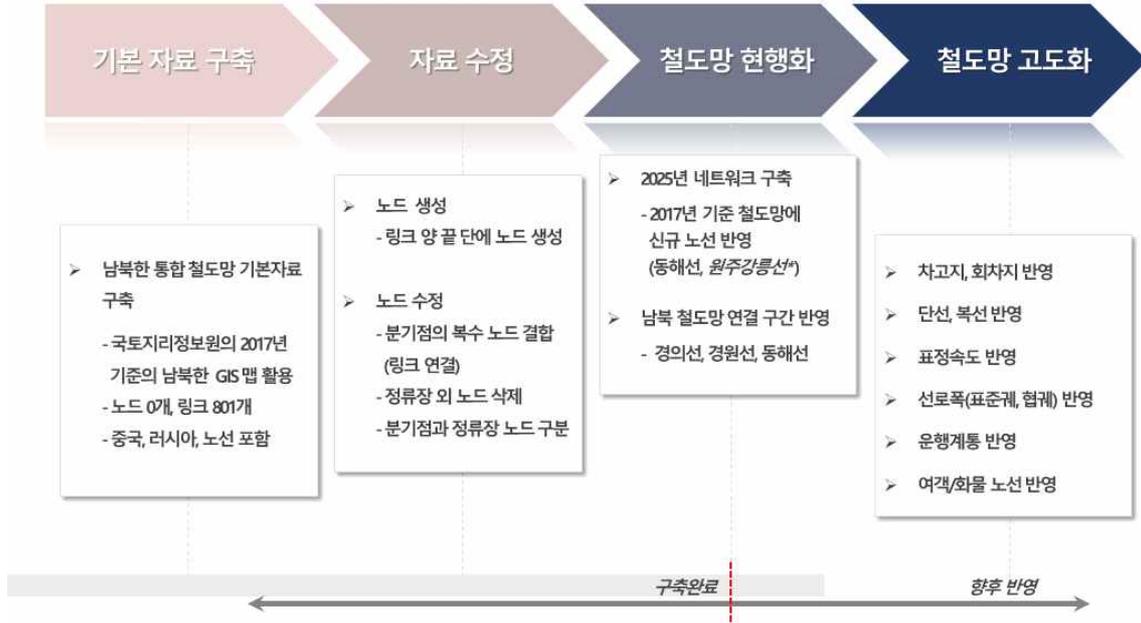
- 첫째, 남북한 통합 철도망에서 링크 치명도를 평가하고 주요 링크를 식별하는 것
- 둘째, 남북한 통합 철도망의 연결 신뢰성을 평가하는 것
- 셋째, 통일을 대비하여 남북한 철도망 연결사업의 링크 치명도 완화 효과 및 연결 신뢰성 제고효과를 평가하는 것



2. 사업 내용

□ 사업 추진 내용

- 남북한 통합 철도망 분석DB 구축



- 평가지표 및 방법론 개발

1) 링크 치명도 I

$$I_{ij}(a) = \sum_o \sum_{d \neq o} w_{od} \Delta P_{od}^{(a)} / N_{O_i D_j}, \quad o \in O_i, d \in D_j.$$

- $I_{ij}(a)$: 지역 i 와 j 간 통행에서 링크 a 의 치명도
- O_i : 지역 i ($i \in s$ or $i \in n$)에 위치한 출발역 o 의 집합
- s : 남한, n : 북한
- $\Delta P_{od}^{(a)} = P_{od}^{(a)} - P_{od}^{(0)}$, $o \in O_i, d \in D_j$.
- P^a : 링크 a 에 기능장애가 있을 때 철도망 퍼포먼스

2) 연결 신뢰성 R

$$R_{ij}(a) = U_{od}^{(a)} / N_{O_i D_j}, \quad o \in O_i, d \in D_j.$$

- $R(a)$: 링크 a 의 연결 신뢰성
- D_j : 지역 j ($j \in s$ or $j \in n$)에 위치한 도착역 d 의 집합
- $U_{od}^{(a)}$: 링크 a 에 기능장애가 있을 때 유효경로가 없는 od 쌍의 수
- $N_{O_i D_j}$: $O_i D_j$ 쌍의 수

3) 링크 치명도 완화 효과 M

$$M_{ij}(a) = \frac{\sum_{X \neq a} I_{ij}(X)}{\sum_{X \neq a} I_{ij}(X|a)}.$$

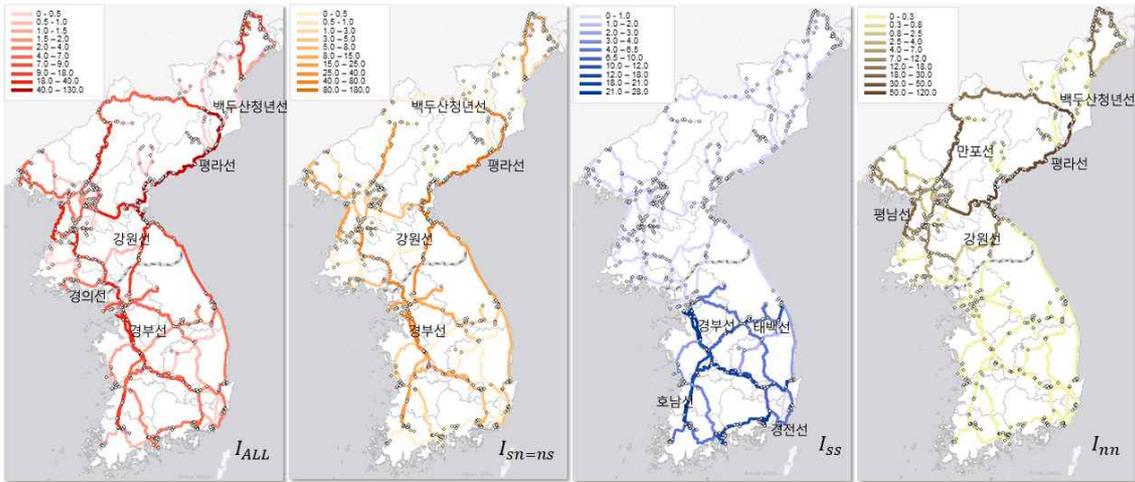
- $I(X|a)$: 링크 a 에 기능장애(또는 개통전)가 있는 조건에서 링크 X 의 치명도

4) 연결 신뢰성 제고 효과 E

$$E_{ij}(a) = \frac{\sum_{X \neq a} R_{ij}(X)}{\sum_{X \neq a} R_{ij}(X|a)}.$$

- $R(X|a)$: 링크 a 에 기능장애(또는 개통전)가 있는 조건에서 링크 X 의 연결 신뢰성

○ 남북한 통합 철도망의 링크 치명도 및 연결 신뢰성 평가 등



□ 일정별 추진 사항

일 정	추진 내용
2020.3.1.-2020.3.31	선행연구 고찰 (링크 치명도, 연결 신뢰성 정의 및 평가 방법론 검토)
2020.4.1.-2020.5.31	분석 방법론 개발 (링크 치명도, 연결 신뢰성 평가 지표 개발)
2020.6.1.-2020.11.30	남북한 통합 철도망 분석DB 구축
2020.11.30.-2021.1.31	결과 도출

□ 참여 인력

○ 책임자

성 명	대 학	학 과	직 급
장수은	환경대학원	환경계획학과	정교수
연구소(원)	구 내 전 화	휴대전화	이메일
환경계획연구소			jsc@snu.ac.kr

- 주요 참여 인력

성명	소속	직급	이메일
정동재	환경계획연구소	연구원	jdj0418@snu.ac.kr

3. 사업 성과

□ 사업 성과

- 국내외 학술 발표
 - New measures to assess the link criticality of the united rail networks in South and North Korea, 8th International Conference on Transport Network Reliability (Stockholm, 16-18 June, 2021.)
 - 남북한 통합 철도망의 링크 중요도 및 연결 신뢰성 평가. 2020 한국철도학회 춘계학술대회(2020.7.7., 우수논문발표상)
 - 남북한 통합 철도망의 링크 치명도 평가. 2020 통일기반구축사업 연합학술대회(2020.11.27.)
- 북한철도망DB 구축

□ 관련분야 기여도

- 국내외 최초로 북한 철도망 분석 네트워크를 구축하여 남북철도 연구의 근간을 마련함
- 남북한 철도망을 구성하는 개별 링크의 치명도와 연결 신뢰성을 평가하고 남북교류에 중요한 링크를 식별함
 - 통일 이후 나타날 수 있는 장·단기적 교통체계의 변동성에 효율적으로 대비하기 위한 정보를 축적함
- 링크 치명도 완화 효과와 연결 신뢰성 제고 효과를 측정하는 신규 지표를 제안하고 남북한 철도망 연결노선인 경의선, 경원선, 동해선을 대상으로 평가 수행

4. 예산

5. 자체평가 및 건의사항

□ 사업평가

- 사업의 적절성
 - 남북교류 및 통일을 대비하여 남북한 통합 철도망의 취약성을 효과적으로 관리하기 위한 링크 치명도와 연결 신뢰성 정보를 축적하였다는 점에서 사업목적 및 내용이 적절함
- 사업의 효율성
 - 제한된 기초 자료와 예산에도 불구하고 국내외 최초로 북한 철도망 분석 네트워크를 구축하였고, 연구결과 일부를 정리한 논문이 학술대회에서 우수논문발표상을 수여하는 등 학계에서 연구성과를 인정받음. 따라서 사업이 효율적으로 수행되었다고 평가됨
- 사업의 영향력
 - 장래 철도사업 계획의 수립 및 우선순위 평가에서 링크 치명도 완화효과 및 연결 신뢰성 제고 효과 지표를 활용할 수 있음
 - 링크 치명도 및 연결 신뢰성 정보를 바탕으로 취약구간에 대한 특별 관리방안을 마련하거나 취약성 개선 방안을 수립할 수 있음
 - 국내외 최초로 북한 철도망 분석 네트워크를 구축하여 남북철도 연구의 근간을 마련함
- 사업의 발전가능성
 - 이 사업을 통해 구축된 북한철도망DB를 토대로 북한 철도망 분석 네트워크의 고도화 사업으로 확장 가능
 - 링크 기반 분석(링크 치명도, 연결 신뢰성) 뿐만 아니라 향후 노드 기반 분석(노드 중심성 등)을 연계 수행하여 남북한 철도망의 중장기 계획 및 운영 전략 제시 가능

□ 미흡한 점(한계) 및 개선(보완)할 점

- 국내외 최초로 북한 철도망 분석 네트워크를 구축하였으나

매우 제한된 기초 자료와 예산으로 인해 링크와 노드의 속성 정보가 충분하지 않으며, 그 결과 노드 중심성 등 과학적 네트워크 분석의 제약요인이 되고 있음

- 네트워크의 기본속성이 포함된 남북한 통합 철도망 분석DB를 구축할 필요가 있음
- 링크 치명도, 연결 신뢰성 등 링크(철도구간) 기반의 분석을 완료하였으나 노드 중심성 등과 같은 노드(철도정류장) 기반의 후속 연구가 요구됨

□ 향후 계획

- 북한 철도망 분석 네트워크를 고도화하여 기존 북한 철도망 DB의 한계를 극복하고 네트워크의 기본속성이 포함된 과학적 네트워크를 최종 구축할 계획
- 노드 중심성 분석을 통해 남북한 철도망의 중장기 계획 및 운영 전략을 제시할 계획

6. 성과 관련 지표

□ 대표 사업 실적

- New measures to assess the link criticality of the united rail networks in South and North Korea, 8th International Conference on Transport Network Reliability (Stockholm, 16–18 June, 2021. accept)

□ 성과 자율 지표

- 국외 학술 발표 1건
 - New measures to assess the link criticality of the united rail networks in South and North Korea, 8th International

Conference on Transport Network Reliability (Stockholm, 16-18 June, 2021.)

- 국내 학술 발표 2건
 - 남북한 통합 철도망의 링크 중요도 및 연결 신뢰성 평가. 2020 한국철도학회 춘계학술대회(2020.7.7.)
 - 남북한 통합 철도망의 링크 치명도 평가. 2020 통일기반구축사업 연합학술대회(2020.11.27.)
- 우수논문발표상 수여
 - 남북한 통합 철도망의 링크 중요도 및 연결 신뢰성 평가. 2020 한국철도학회 춘계학술대회(2020.7.7.)
- 북한철도망DB 구축
 - 국내외 최초로 북한 철도망 분석 네트워크 구축

제1절 연구 배경

2018년 4월 27일 남북정상회담이 열렸다. 이 날 발표된 선언문에는 남북한 교류를 촉진하기 위한 동해선, 경의선 등 철도망 연결 추진에 관한 내용이 포함되었다. 같은 해 6월 남북철도협력 분과회담 개최, 7월 동해선 및 경의선 남북 연결구간 공동 점검, 9월 평양공동선언에서 연내 철도 착공식 합의, 11월 철도 공동조사에 대한 유엔 제재 면제를 거치며 11월 30일부터는 총 18일간 남북철도 북측구간의 현지 공동조사가 실시되었다. 남한의 열차가 2007년 이후 약 13년만에 북한으로 넘어가 북측 철도시설의 실태 파악과 이후 남북 통합 철도망 구축을 위한 기초자료를 수집하였으며 특히 동해선 금강산-두만강 구간은 남한 열차가 분단 이후 처음으로 운행되었다. 이처럼 남북한의 철도망 연결은 활발하게 추진되고 있다.



사진: 대한민국 청와대(<http://www.president.go.kr/>).

남북철도 협력 경과 및 현지 공동조사

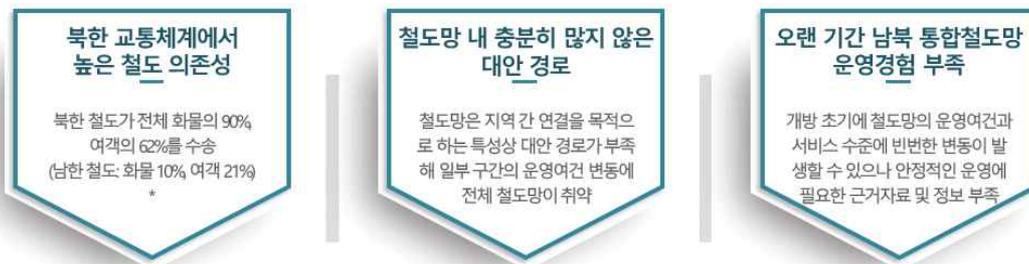
- (4.27.) 판문점 정상회담에서 철도·도로 연결 및 현대화 합의
- (6.26.) 남북철도협력 분과회담 개최
- (7.20.) 동해선 남북 연결구간 공동 점검
- (7.24.) 경의선 남북연결구간 공동 점검 및 공동연구 조사단 제1차 회의 개최
- (8.9.) 공동연구조사단 제2차 회의 개최
- (9.19.) 평양공동선언에서 연내 철도, 도로 착공식 합의
- (10.15.) 남북 고위급 회담서 '10월 하순부터 공동조사, '11월 말-12월 초 착공식' 합의
- (11.24.) 철도 공동조사에 대한 유엔 제재 면제
- (11.30.) 남북철도 현지공동조사 시행



그림: 국토교통부.

북한에서 철도는 전체 화물의 90%, 여객의 62%를 수송하는 중요한 교통수단이다(임재경, 2007; 국회예산정책처, 2019에서 재인용). 따라서 남북한 교류를 위한 초기 단계에서 남북한의 통합 철도망의 역할이 중요할 것으로 예상된다. 그러나 남북한 통합 철도망은 오랜기간 공동으로 운영된 경험이 없을 뿐만 아니라, 주요 기종점간을 연결하는 철도망의 특성상 대안 경로가 부족하기 때문에 일부 구간의 운영 여건 변동으로 인해 전체 철도망의 서비스 수준이 영향을 받을 수 있다. 단지 남북한 철도망을 연결하는 것에 그치지 않고 여러 돌발상황에서도 남북지역간 교류를 정상 수준으로 지속할 수 있는, 즉 돌발상황에 취약하지 않은 남북한 통합 철도망 계획이 필요한 이유이다.

남북한 철도망 취약성 관리의 중요성



개방 이후 나타날 수 있는 철도망의 장·단기적 변동성에 효과적으로 대비하기 위하여

1. 남북한 통합 철도망 내 링크의 치명도와 전체 철도망의 연결 신뢰성에 관한 정보 필요
2. 남북한 통합 철도망의 취약성(vulnerability)을 낮추기 위한 장래 활동사업 평가 기준 필요

제2절 연구 목적

남북한 통합 철도망을 여러 돌발상황에서도 정상 수준에 준하게 지속 운영하기 위해서는 철도망의 링크 치명도와 연결 신뢰성에 관한 정보를 토대로 철도망 계획 및 관리가 이루어져야 한다. 따라서 이 연구의 목적은 크게 세 가지이다. 첫째, 남북한 통합 철도망에서 링크 치명도를 평가하고 남북교류에 중요한 링크를 식별하는 것이다. 링크 치명도 정보는 남북한 통합 철도망의 운영에 치명적인 구간을 시사하므로 이 정보를 바탕으로 해당 링크에 대한 특별 관리방안을 마련하거나 남북한 통합 철도망의 링크 치명도를 분산하는 등의 취약성 개선 방안을 수립할 수 있다. 둘째, 남북한 통합 철도망의 연결 신뢰성을 평가하는 것이다. 연결 신뢰성은 남북한 통합 철도망에 발생할 수 있는 여러 돌발상황에서 남북한 통합 철도망을 정상 수준으로 지속할 수 있는지에 관한 정보를 제공한다. 셋째, 링크 치명도 평가체계로 남북한 연계 철도 사업의 효과를 측정한다. 이 과정에서 링크 치명도 완화 효과를 측정하는 신규 지표를 제안하고 장래 철도사업 계획의 수립 및 우선순위 평가에 활용하기 위한 시사점을 도출한다.

연구의 목적



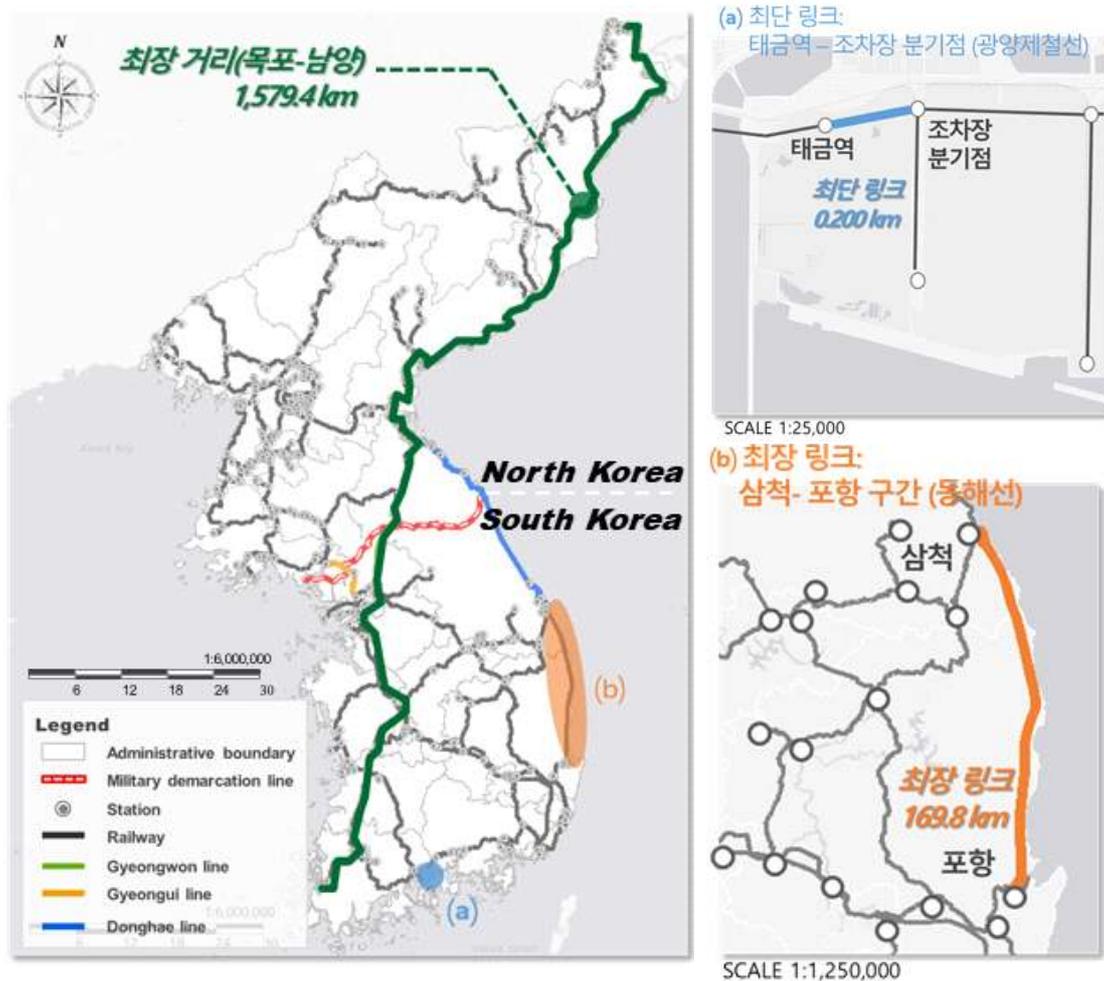
제2장 자료 구축

제1절 남북한 통합 철도망

남북한 통합 철도망 자료는 네 단계 즉, 기본자료 구축, 자료 수정, 철도망 현행화, 철도망 고도화 단계를 거쳐 구축할 수 있다. 먼저 기본자료 구축 단계에서는 국토지리정보원에서 제공하는 GIS맵에서 철도링크를 추출한다. 이 GIS맵에는 링크 정보만 포함되어 있다. 두 번째 자료 수정 단계에서 링크의 양끝 단에 노드를 생성한다. 인접한 링크는 양끝 단에 생성된 복수의 노드를 한 개의 노드로 결합하여 연결해준다. 기본 자료에는 노선의 선형을 표시하기 위해 정류장 외의 노드도 다수 포함되어 있는데 데이터베이스를 간소화하기 위해 분기점과 정류장이 아닌 노드는 삭제한다. 분기점을 포함한 일반 노드와 정류장 노드를 구분해 코딩하는 것도 두 번째 단계에서 이뤄진다. 세 번째 철도망 현행화 단계에서는 2017년 기준의 철도망에 남북한 철도망을 잇는 경의선, 경원선, 동해선과 신규 개통한 원주강릉선 등을 반영한다. 마지막 네 번째 철도망 고도화 단계에서는 철도망의 제반시설(차고지, 회차지 등), 선로 특성(단선, 복선), 표정속도, 선로폭(표준궤, 협궤 등), 운행계통 등에 관한 사항을 철도망에 반영한다. 한편 이 연구에서는 세 번째 단계까지 완료된 남북한 통합 철도망 자료를 이용한다. 네 번째 철도망 고도화 과정은 후속 과제로 남긴다.



이 연구에서 구축된 남북한 통합철도망은 <그림 2-1>과 같다. <표 2-1>은 통합철도망의 노드, 링크에 관한 상세 내역을 정리한 것이다. 노드는 총 537개, 링크는 총 591개이며 출발 노드-도착노드 쌍(OD pair)은 288,369개이다. 링크의 평균 연장은 약 15.7km이고, 최단 연장은 0.2km, 최장 연장은 169.8km이다. OD pair간 최단거리 중에서 가장 긴 구간은 목포-남양간 1,579.4km이며 가장 짧은 구간은 태금역-조차장 분기점간 0.2km이다.



<그림 2-1> 남북한 통합철도망

<표 2-1> 남북한 통합철도망 노드, 링크 상세 정보

구분	개수	연장 (km)			
		최장	최단	평균	표준편차
OD pair	288,369	1,579.4	0.2	553.6	332.5
링크	591	169.8	0.2	15.7	22.4
노드	537	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

제2절 통행수요

이 연구는 남북한 통합철도망의 통행수요를 인구특성 자료로 분석한다. 남북한 통합 철도망의 관측 통행량 자료가 없기 때문에 통행량의 대리지표로 인구를 적용한 것이다. 남북한 시도 행정구역별 인구특성은 <표 2-2>와 같다.

<표 2-2> 남북한의 시도 행정구역별 인구특성

지역	시도 행정구역	1993년 인구			2008년 인구		
		인구 (1,000명)	구성비 (%)	인구밀도 (명/km ²)	인구 (1,000명)	구성비 (%)	인구밀도 (명/km ²)
남한	서울특별시	10,889	24.2	17,991.2	10,201	20.6	16,853.4
	부산광역시	3,863	8.6	5,043.2	3,565	7.2	4,653.9
	대구광역시	2,312	5.1	2,615.3	2,493	5.0	2,819.5
	인천광역시	2,138	4.8	2,116.5	2,693	5.4	2,665.1
	광주광역시	1,249	2.8	2,491.4	1,423	2.9	2,838.6
	대전광역시	1,189	2.6	2,202.6	1,481	3.0	2,743.2
	울산광역시	n.a.	n.a.	n.a.	1,112	2.2	1,051.9
	경기도	7,005	15.6	691.3	11,292	22.8	1,114.3
	강원도(남)	1,540	3.4	92.7	1,509	3.0	90.8
	충청북도	1,418	3.2	190.8	1,520	3.1	204.4
	충청남도	1,856	4.1	215.8	2,019	4.1	234.7
	전라북도	2,016	4.5	250.1	1,856	3.7	230.2
	전라남도	2,235	5.0	183.0	1,919	3.9	157.1
	경상북도	2,876	6.4	151.2	2,674	5.4	140.5
	경상남도	3,903	8.7	336.8	3,225	6.5	306.3
	남한 소계	45,001	100.0	450.8	49,540	100.0	496.3
	북한	양강도	638	3.1	46.0	719	3.1
함경북도		2,061	10.0	123.1	2,327	10.0	139.0
함경남도		2,732	13.3	147.2	3,066	13.1	165.2
강원도(북)		1,304	6.4	117.0	1,478	6.3	132.5
자강도		1,153	5.6	68.8	1,300	5.6	77.5
평안북도		2,437	11.9	193.8	2,729	11.7	217.0
평안남도		3,598	17.5	272.3	4,052	17.4	306.7
황해북도		1,846	9.0	195.1	2,114	9.1	223.4
황해남도		2,011	9.8	242.5	2,310	9.9	278.6
평양시		2,741	13.4	1297.3	3,255	13.9	1540.6
북한 소계		20,522	100.0	167.2	23,350	100.0	190.2

자료: 행정안전부, 「주민등록인구현황」.
한국토지주택공사, 「도시계획현황」.
통계청(2011), 북한 인구와 인구센서스 분석.

제1절 정의

이 연구는 남북한 통합 철도망의 링크 치명도와 연결 신뢰성을 평가한다. 먼저 링크 치명도는 교통망 취약성(vulnerability)에 관한 연구분야에서 등장한 개념으로서, 어느 링크의 치명도는 그 링크의 기능저하가 전체 철도망에 미칠 수 있는 영향력으로 정의된다 (Jenelius et al., 2006). 링크 치명도가 높을수록 남북한 통합 철도망의 운영에 중요한 링크이며 특별 관리가 필요한 구간을 의미한다.

신뢰성(reliability)은 일반적으로 정상 퍼포먼스로 기능할 수 있는 가능성으로 정의한다 (Wakabayashi and Iida, 1992, Berdica, 2002; Chen et al., 2002; D’Este and Taylor, 2003; Jenelius et al., 2006). 이 연구에서 연결 신뢰성(connectivity reliability)은 남북한 철도망의 모든 정류장이 서로 연결된 상태로 유지돼 있을 가능성, 즉 출발역과 도착역간 유효 경로가 존재할 가능성으로 정의한다. 연결 신뢰성이 높을수록 남북한 통합 철도망이 여러 돌발상황에서도 정상 수준의 연결 측면에서 정상 운영을 지속할 수 있다.

이 연구에서는 링크 치명도 완화 효과와 연결 신뢰성 제고 효과도 측정한다. 어느 링크의 링크 치명도 완화 효과는 해당 링크가 철도망 내 다른 링크의 치명도를 경감하는 정도로 정의한다. 어느 링크의 연결 신뢰성 제고 효과는 해당 링크가 전체 철도망의 연결 신뢰성을 높이는 정도로 정의한다.

정의

1) 링크 치명도 (link criticality)

- 교통망 취약성(vulnerability)에 관한 연구분야에서 등장한 개념
- 어느 링크의 치명도는 그 링크의 기능저하가 전체 철도망에 미칠 수 있는 영향력 (Jenelius et al., 2006)으로 정의
- 링크 치명도가 높을수록 남북한 통합 철도망의 운영에 중요한 링크이며 특별 관리가 필요

2) 연결 신뢰성 (connectivity reliability)

- 연결 신뢰성은 남북 철도망의 모든 정류장이 서로 연결된 상태로 유지돼 있을 가능성, 즉 출발역과 도착역 간 유효 경로가 존재할 가능성으로 정의
- 연결 신뢰성이 높을수록 남북 간 교류를 정상적으로 지속할 수 있음을 의미

3) 링크 치명도 완화 효과, 연결 신뢰성 제고 효과

- 링크 치명도 완화 효과: 해당 철도 링크가 철도망 내 다른 링크의 치명도를 경감하는 정도
- 연결 신뢰성 제고 효과: 해당 철도 링크가 철도망의 연결 신뢰성을 높이는 정도

제2절 측정 방법

이 연구는 출발역 $o \in O_i$ 과 도착역 $d \in D_j$ 이 속한 위치 $i \in \{s, n\}$, $j \in \{s, n\}$ 를 남한 s 또는 북한 n 으로 구분하여 링크 a 의 치명도 $I_{ij}(a)$ 를 측정한다. 즉, 링크 a 에 충격이 발생할 때 남북한 통합 철도망에서의 링크 치명도 $I(a)$ 뿐만 아니라 남한-남한간, 남한-북한간, 북한-북한간 철도망에서의 링크 치명도 $I_{ss}(a)$, $I_{sn}(a)$, $I_{nn}(a)$ 를 식(1)과 같이 산출한다.

$$I_{ij}(a) = \sum_o \sum_{d \neq o} w_{od} \Delta L_{od}^{(a)} / N_{O_i D_j}, \quad o \in O_i, d \in D_j \quad \text{식(1)}$$

여기서 $\Delta L_{od}^{(a)}$ 는 링크 a 에 충격이 발생할 때 철도망의 서비스 수준 변화량이다. 이 연구에서 충격은 링크가 단절되는 상황으로 가정하며, $\Delta L_{od}^{(a)}$ 는 이로 인해 출발역 o 와 도착역 d 간 최단거리의 변화량으로 측정한다. w_{od} 는 출발역 o 와 도착역 d 간 통행행태 및 운행특성을 반영하기 위한 가중치이다. 이 연구에서는 통행수요 특성을 반영하기 위해 출발역 o 과 도착역 d 가 속한 시도 행정구역의 인구 P_o , P_d 의 곱, 즉 $w_{od} = P_o P_d / 1,000,000$ 로 적용한다. 지환마지막으로 $N_{O_i D_j}$ 는 출발역 o 가 속한 지역 $i \in \{s, n\}$ 의 정류장 집합 O_i 과 도착역 d 가 속한 지역 $j \in \{s, n\}$ 의 정류장 집합 D_j 쌍의 총 개수이다. 따라서 링크 a 의 치명도 $I_{ij}(a)$ 는 링크 a 가 단절될 때 분석 대상 지역 ij 에 속한 모든 출발역 $o \in O_i$ 에서 도착역 $d \in D_j$ 까지의 통행거리 변화량 $\Delta P_{od}^{(a)}$ 을 통행수요 가중치 w_{od} 로 가중 합산한 것을 출발역-도착역 쌍 개수로 나눈 것이다.

링크 a 의 연결 신뢰성 $R_{ij}(a)$ 은 식(2)와 같이 산출한다.

$$R_{ij}(a) = U_{od}^{(a)} / N_{O_i D_j}, \quad o \in O_i, d \in D_j \quad \text{식(2)}$$

여기서 $U_{od}^{(a)}$ 는 링크 a 가 단절될 때 유효경로가 없는 출발역-도착역 쌍 개수이다. 따라서 링크 a 연결 신뢰성 $R(a)$ 은 링크 a 가 단절될 때 $O_i - D_j$ 쌍의 총 개수 중에서 유효경로가 없는 출발역-도착역 쌍 개수의 비율로 측정된다. 이 연구에서 유효경로는 충격 발생 전 출발역-도착역간 최단거리 대비 2배 미만의 경로거리를 갖는 경로로 정의한다. 즉 링크가 단절된 후의 최단거리가 링크가 단절되기 전의 최단거리에 비해 2배 이상일 경우, 또는 연결된 경로가 전혀 없는 경우, 해당 출발역-도착역은 유효경로가 없는 것이다.

링크 a 의 링크 치명도 완화 효과 $M(a)$ 는 식(3)과 같이 산출한다.

$$M_{ij}(a) = \frac{\sum_{X \neq a} I_{ij}(X)}{\sum_{X \neq a} I_{ij}(X | a)} \quad \text{식(3)}$$

여기서 $I(X | a)$ 는 링크 a 가 단절된 상황에서의 링크 X 의 치명도를 의미한다. 따라서 $M(a)$ 는 링크 a 가 단절(또는 미개통)된 상황에서의 링크 a 를 제외한 모든 링크의 치명도를 합한 값 대비 링크 a 가 연결된 상황에서의 링크 a 를 제외한 모든 링크의 치명도를 합한 값의 비율로 계산되며 링크 a 가 철도망 내 다른 링크의 치명도를 경감하는 정도이다.

링크 a 의 연결 신뢰성 제고 효과 $E(a)$ 는 식(4)와 같이 산출한다.

$$E_{ij}(a) = \frac{\sum_{X \neq a} R_{ij}(X)}{\sum_{X \neq a} R_{ij}(X | a)} \quad \text{식(4)}$$

여기서 $R(X | a)$ 는 링크 a 가 단절된 상황에서의 링크 X 의 연결 신뢰성을 의미한다. 따라서 $R(a)$ 는 링크 a 가 단절(또는 미개통)된 상황에서의 링크 a 를 제외한 모든 링크의 연결 신뢰성을 합한 값 대비 링크 a 가 연결된 상황에서의 링크 a 를 제외한 모든 링크의 연결 신뢰성을 합한 값의 비율로 계산되며 링크 a 가 철도망의 연결 신뢰성을 높이는 정도이다.

측정 방법

1) 링크 치명도 I

$$I_{ij}(a) = \sum_o \sum_{d \neq o} w_{od} \Delta P_{od}^{(a)} / N_{O_i D_j}, \quad o \in O_i, d \in D_j.$$

- $I_{ij}(a)$: 지역 i 와 j 간 통행에서 링크 a 의 치명도
- O_i : 지역 i ($i \in s$ or $i \in n$)에 위치한 출발역 o 의 집합
- s : 남한, n : 북한
- $\Delta P_{od}^{(a)} = P_{od}^{(a)} - P_{od}^{(0)}$, $o \in O_i, d \in D_j$.
- P^a : 링크 a 에 기능장애가 있을 때 철도망 퍼포먼스

2) 연결 신뢰성 R

$$R_{ij}(a) = U_{od}^{(a)} / N_{O_i D_j}, \quad o \in O_i, d \in D_j.$$

- $R(a)$: 링크 a 의 연결 신뢰성
- D_j : 지역 j ($j \in s$ or $j \in n$)에 위치한 도착역 d 의 집합
- $U_{od}^{(a)}$: 링크 a 에 기능장애가 있을 때 유효경로가 없는 od 쌍의 수
- $N_{O_i D_j}$: $O_i D_j$ 쌍의 수

3) 링크 치명도 완화 효과 M

$$M_{ij}(a) = \frac{\sum_{X \neq a} I_{ij}(X)}{\sum_{X \neq a} I_{ij}(X|a)}$$

- $I(X|a)$: 링크 a 에 기능장애(또는 개통전)가 있는 조건에서 링크 X 의 치명도

4) 연결 신뢰성 제고 효과 E

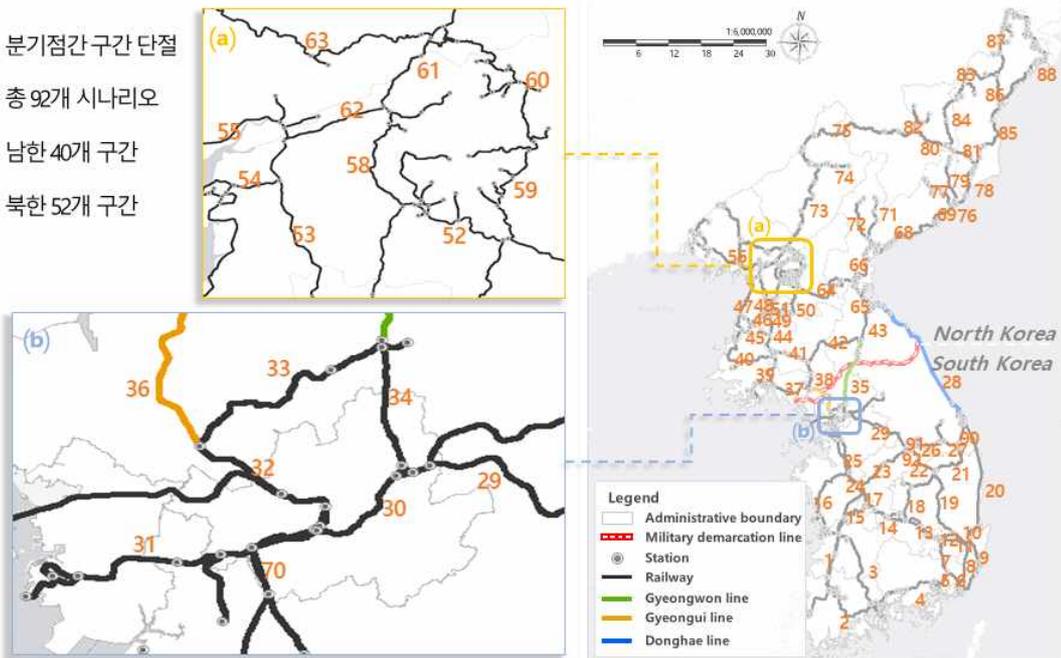
$$E_{ij}(a) = \frac{\sum_{X \neq a} R_{ij}(X)}{\sum_{X \neq a} R_{ij}(X|a)}$$

- $R(X|a)$: 링크 a 에 기능장애(또는 개통전)가 있는 조건에서 링크 X 의 연결 신뢰성

한편 정상 상태로 운영되는 기준 시나리오와 비교되는 충격 시나리오, 즉 링크 a 가 단절되는 시나리오는 총 92개이다. 이 시나리오는 분기점간 구간이 각각 단절되는 상황을 가정한 것으로 남한 40개 구간, 북한 52개 구간이 포함된다.

시나리오 설정

- 분기점간 구간 단절
- 총 92개 시나리오
- 남한 40개 구간
- 북한 52개 구간



제1절 링크 치명도

1. 통행수요 특성 미반영

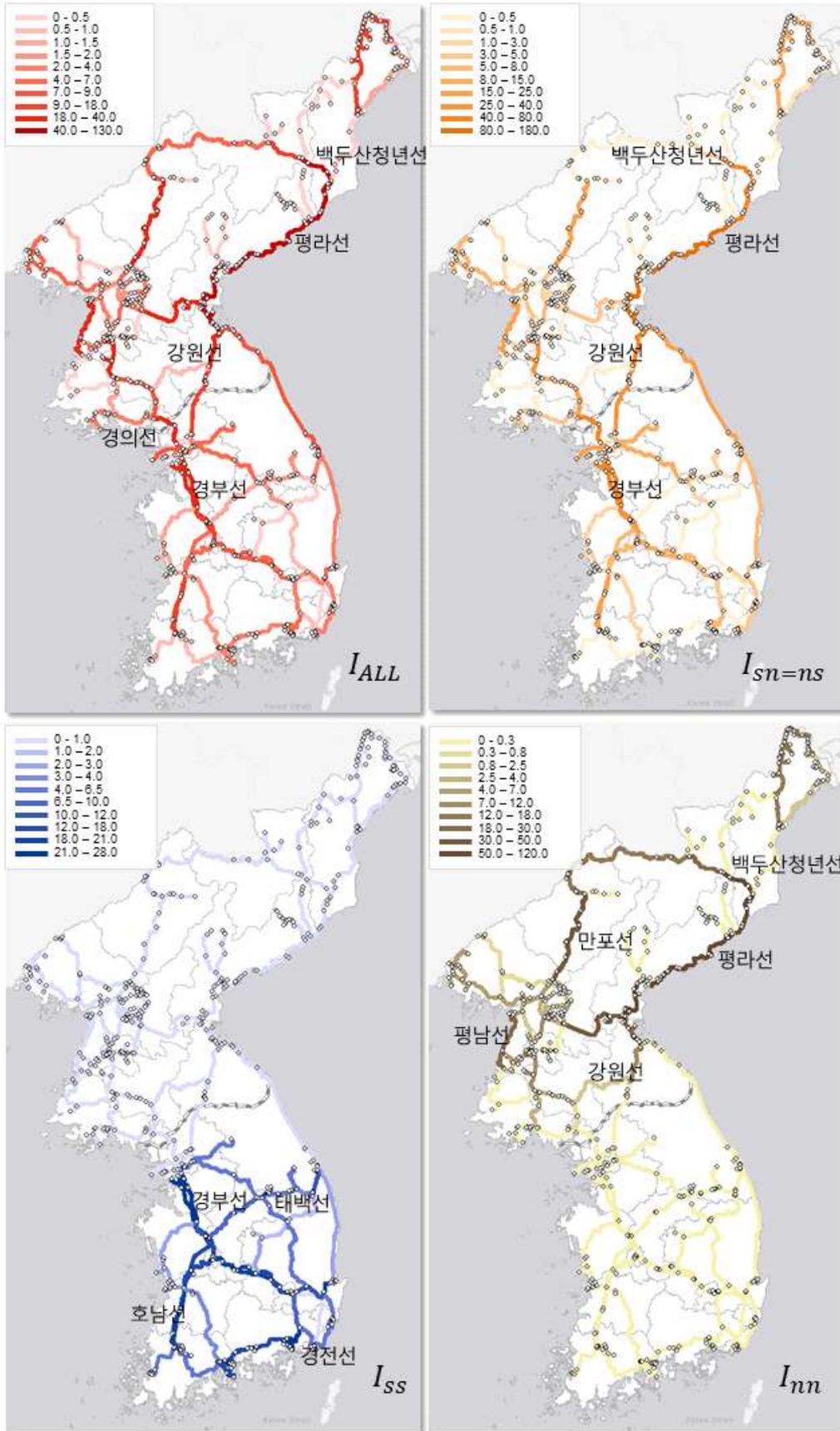
우선 출발역-도착역의 통행수요 특성을 반영하지 않은, 즉 식(1)에서 가중치 w_{od} 에 1을 적용한 링크 치명도를 산출하였다. 이 결과는 링크 a 가 단절될 때 분석 대상 지역 ij 에 속한 모든 출발역 $o \in O_i$ 과 도착역 $d \in D_j$ 간에 증가한 평균 통행거리와 같다. 가장 객관적이고 기초적인 자료로 도출된 결과로서 직관적으로 이해하기 용이하여 참조점으로 활용될 수 있다.

표 3-1은 링크 치명도 I_{ALL} , I_{sn} , I_{ss} , I_{nn} 가 높은 상위 10개 구간과 그 구간의 노선명을 정리한 것이다. 남북한 통합 철도망의 전 지역을 기준으로 평가한 링크 치명도 I_{ALL} 은 북한의 평라선, 강원선, 백두산청년선과 남한의 경부선, 강원선, 남북을 연결하는 경의선 구간에서 높게 나타난다. 북한에 위치한 구간이 대안경로가 부족하여 치명도가 높은 것으로 해석된다. 남-북(또는 북-남)간 치명도 I_{sn} 에서도 평라선, 강원선, 경부선, 경의선, 백두산청년선 구간의 값이 크게 나타난다. 남한 내부에서의 치명도 I_{ss} 는 동서축의 경전선 구간의 값이 가장 높고, 이어서 경부선, 태백선, 호남선, 동해선 구간의 치명도가 높게 나타난다. 북한 내부의 치명도 I_{nn} 는 평라선, 백두산청년선, 만포선, 평남선, 강원선 구간에서 높다.

<표 3-1> 링크 치명도 상위 10개 구간 (가중치 미반영)

순 위	전체			남-북			남-남			북-북		
	구간	노선	I_{ALL}	구간	노선	I_{sn}	구간	노선	I_{ss}	구간	노선	I_{nn}
1	66	평라선	129.9	66	평라선	179.4	5	경전선	27.9	66	평라선	118.8
2	68	평라선	77.9	65	강원선	107.3	25	경부선	21.8	68	평라선	79.4
3	76	평라선	64.4	68	평라선	101.2	14	경부선	20.8	76	평라선	74.9
4	65	강원선	60.2	70	경부선	78.6	92	태백선	20.8	78	평라선	70.6
5	78	평라선	56.5	76	평라선	76.2	1	호남선	19.5	81	백두산 창년선	69.9
6	81	백두산 창년선	51.5	78	평라선	63.0	10	동해선	18.5	64	평라선	48.9
7	70	경부선	39.4	25	경부선	59.5	91	태백선	18.2	73	만포선	37.9
8	25	경부선	31.4	36	경의선	56.6	4	경전선	17.9	47	평남선	29.9
9	43	강원선	27.5	81	백두산 창년선	53.0	13	경부선	17.6	80	백두산 창년선	25.7
10	36	경의선	26.8	43	강원선	51.5	17	경부선	16.8	65	강원선	24.9

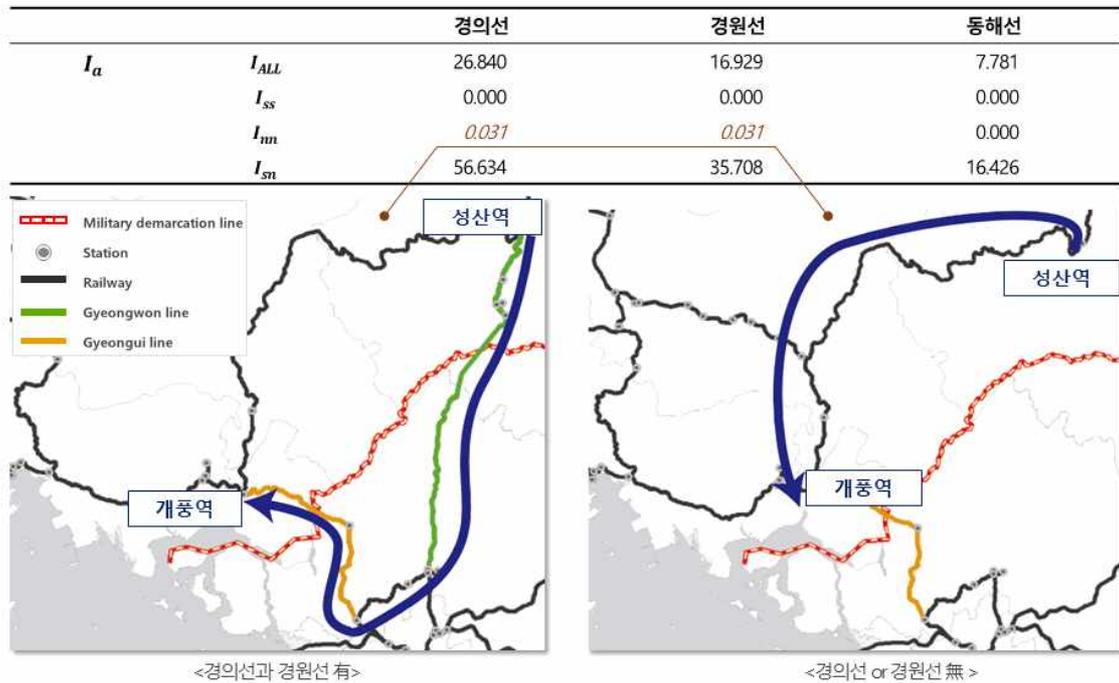
링크 치명도 I_{ALL} , I_{sn} , I_{ss} , I_{nn} 를 도면에 나타내면 다음과 같다.



남북한 연결노선인 경의선, 경원선, 동해선의 링크 치명도 I_{ALL} , I_{sn} , I_{ss} , I_{nn} 는 다음과

같다. I_{ALL} 과 I_{sn} 기준으로 경의선, 경원선, 동해선 순으로 치명도가 높다. 또한 세 노선은 남북한 연결노선 특성상 I_{ALL} 보다 I_{sn} 이 더 크다. 세 노선의 I_{ss} 는 모두 0으로 나타난다. 반면에 경의선과 경원선의 I_{nn} 는 0보다 크게 나타난다. 북한에 위치한 두 정류장인 성산역, 개풍역간 최단경로가 남북한 연결노선인 경의선과 경원선을 통과하기 때문이다.

남북 연결구간 링크 치명도



경의선, 경원선, 동해선의 링크 치명도 완화효과 M_{ALL} , M_{sn} , M_{ss} , M_{nn} 는 다음과 같다. 링크 치명도의 완화효과 M 도 링크 치명도 I 처럼 남북한 전체 정류장간에서보다 남북한 정류장간의 완화효과가 더 크게 나타난다(즉 M_{ALL} 보다 M_{sn} 이 더 작다). M_{ALL} 과 M_{sn} 기준으로 경의선, 동해선, 경원선 순으로 완화효과가 높게 나타난다. 이 결과는 링크 치명도에서 경의선, 경원선, 동해선 순으로 높았던 순서와 다르다. 개별 링크로서의 링크 치명도는 동해선이 경원선보다 낮지만, 다른 노선의 링크 치명도에 미치는 영향은 동해선이 경원선보다 더 큰 것을 의미한다. 한편 세 노선의 M_{ss} , M_{nn} 에 0이 아닌 값이 있는 것은 최단경로가 남북한 연결노선을 이용하는 기종점 정류장 쌍이 있기 때문이다(예시: 청량리역-강릉역).

남북 연결구간의 링크 치명도 완화 효과

		경의선	강원선	동해선
M_a	M_{ALL}	0.903	0.960	0.926
	M_{ss}	1.000	0.994	0.994
	M_{nn}	0.996	0.996	1.000
	M_{sn}	0.857	0.941	0.890

• 링크 치명도 순위와 다름



2. 통행수요 특성 반영

철도망의 통행수요 특성을 반영한 링크 치명도는 다음과 같다. 가중치는 출발역 o 와 도착역 d 가 속한 시도 행정구역의 인구를 적용하였다. 표 3-2는 링크 치명도 I_{ALL} , I_{sn} , I_{ss} , I_{nn} 가 높은 상위 10개 구간이다. 남북한 통합 철도망의 전 지역을 기준으로 평가한 링크 치명도 I_{ALL} 은 북한의 평라선 네 구간, 강원선 두 구간, 백두산청년선 한 구간과 남한의 경부선 두 구간, 남북을 연결하는 경의선 구간에서 높게 나타난다. 통행수요 특성을 반영한 결과도 통행수요를 미반영한 결과처럼 여전히 대안경로가 부족한 북한에서 링크 치명도가 크게 나타난다. 통행수요를 미반영한 결과와 크게 다른 점은 경부선 70번 구간의 치명도 순위가 7위에서 3위로 오른 점이다. 이는 경부선 70번 구간이 속한 서울시의 인구, 즉 통행수요를 고려하면 해당 구간의 링크 치명도가 높기 때문이다. 남-북(또는 북-남)간 치명도 I_{sn} 는 평라선 네 구간, 강원선 두 구간, 경부선과 경의선 각 한 구간, 평부선 두 구간의 값이 크게 나타난다. 통행수요 미반영 결과와 가장 큰 차이점은 링크 치명도 상위 10개 구간에 함경북도의 백두산청년선대신 평양특별시를 지나는 평부선이 포함된 점이다. 함경북도보다 평양특별시의 인구가 더 많은 것이 반영되어서 백두산청년선보다 평부선의 링크 치명도가 크게 평가된 것으로 해석된다. 남한 내부에서의 치명도 I_{ss} 는 경부선 여섯 구간, 경전선, 태백선, 동해선, 호남선 각 한 구간의 값이 크다. 통행수요 미반영 대비 경전선, 호남선, 동해선 구간은 덜 치명적인 것으로

로, 경부선 구간은 더 치명적인 것으로 도출되었다. 북한 내부의 치명도 I_{nn} 는 평라선 다섯 구간, 백두산청년선(함경북도), 평남선, 만포선, 평부선, 함북선 각 한 구간에서 높게 나타난다. 통행수요 미반영시 포함됐던 강원선(강원도)과 백두산청년선(양강도) 구간 대신 함북선(함경북도)과 평부선(평양) 구간이 포함되었다. 통행수요의 영향이 반영된 결과이다.

<표 3-2> 링크 치명도 상위 10개 구간 (가중치 반영)

순 위	전체			남-북			남-남			북-북		
	구간	노선	I_{ALL}	구간	노선	I_{sn}	구간	노선	I_{ss}	구간	노선	I_{nn}
1	66	평라선	1,100.4	66	평라선	1,541.9	70	경부선	479.4	66	평라선	979.6
2	68	평라선	590.7	65	강원선	808.5	25	경부선	416.6	68	평라선	577.3
3	70	경부선	447.0	70	경부선	793.2	5	경전선	219.2	76	평라선	492.5
4	76	평라선	445.0	68	평라선	786.8	24	경부선	205.4	64	평라선	453.7
5	65	강원선	421.3	36	경의선	548.4	92	태백선	204.6	78	평라선	427.6
6	78	평라선	362.1	76	평라선	546.7	14	경부선	200.0	81	백두산 청년선	400.7
7	81	백두산 청년선	317.4	43	강원선	510.9	17	경부선	199.6	47	평남선	258.4
8	36	경의선	259.9	78	평라선	423.4	13	경부선	176.7	73	만포선	157.3
9	43	강원선	254.7	44	평부선	401.6	10	동해선	130.4	49	평부선	118.7
10	25	경부선	218.8	49	평부선	366.8	1	호남선	128.9	87	함북선	115.6

통행수요가 반영된 링크 치명도 I_{ALL} , I_{sn} , I_{ss} , I_{nn} 를 도면에 나타내면 다음과 같다.



남북한 연결노선인 경의선, 경원선, 동해선의 통행수요가 반영된 링크 치명도 I_{ALL} , I_{sn} , I_{ss} , I_{nn} 는 다음과 같다. I_{ALL} 과 I_{sn} 기준으로 경의선, 경원선, 동해선 순으로 치명도가 높으며 이 결과는 통행수요가 반영되지 않은 링크 치명도에서의 순서와 같다. 또한 세 노선은 남북한 연결노선 특성상 I_{ALL} 보다 I_{sn} 이 더 크다. 세 노선의 I_{ss} 는 모두 0으로 나타난다. I_{nn} 에서 경의선과 경원선의 값이 0이 아닌 이유는 북한에 위치한 두 정류장인 성산역, 개풍역간 최단경로가 남북한 연결노선인 경의선과 경원선을 통과하기 때문이다.

남북 연결구간 링크 치명도 (통행수요 반영)

		경의선	경원선	동해선
I_a	I_{ALL}	259.864	154.019	36.752
	I_{ss}	0.000	0.000	0.000
	I_{nn}	0.107	0.107	0.000
	I_{sn}	548.420	325.007	77.579

통행수요가 반영된 경의선, 경원선, 동해선의 링크 치명도 완화효과 M_{ALL} , M_{sn} , M_{ss} , M_{nn} 는 다음과 같다. 링크 치명도의 완화효과 M 도 링크 치명도 I 처럼 남북한 전체 정류장간에서보다 남북한 정류장간의 완화효과가 더 크게 나타난다(즉 M_{ALL} 보다 M_{sn} 이 더 작다). M_{ALL} 과 M_{sn} 기준으로 경의선, 경원선, 동해선 순으로 완화효과가 높게 나타나며 이 결과는 링크 치명도에서의 순서와 같다. 통행수요를 미반영한 링크 치명도와 완화효과에서 순서가 달랐던 것과 차별되는 점이다. 한편 세 노선의 M_{ss} , M_{nn} 에 0이 아닌 값이 있는 것은 최단경로가 남북한 연결노선을 이용하는 기종점 정류장 쌍이 있기 때문이다(예시: 청량리역-강릉역).

남북 연결구간의 링크 치명도 완화 효과 (통행수요 반영)

		경의선	경원선	동해선
M_a	M_{ALL}	0.862	0.912	0.950
	M_{ss}	1.000	0.991	0.991
	M_{nn}	0.997	0.997	1.000
	M_{sn}	0.804	0.874	0.924

제2절 연결 신뢰성

표 3-3은 연결 신뢰성 R_{ALL} , R_{sn} , R_{ss} , R_{nn} 가 높은 상위 10개 구간과 그 구간의 노선 명을 정리한 것이다. 연결 신뢰성의 각 수치는 해당 구간이 단절된 후의 최단거리가 단절되기 전의 최단거리에 비해 2배 이상이거나 연결된 경로가 전혀 없는, 즉 유효경로가 없는, 출발역-도착역 쌍 개수의 비율으로서 그 값이 클수록 남북한 철도망의 모든 정류장간 유효 경로가 존재할 가능성이 낮은 것으로 해석한다. 먼저 남북한 통합 철도망의 전 지역을 기준으로 평가한 연결 신뢰성 R_{ALL} 은 평라선 다섯 구간, 백두산청년선, 만포선, 평남선, 강원선, 경부선 구간에서 크게 나타난다. 대안경로가 부족한 북한 철도망 구간에서 R_{ALL} 이 크게 나타나는 것으로 판단된다. 남-북(또는 북-남)간 연결 신뢰성 R_{sn} 에서는 평라선 세 구간, 경부선, 경의선, 강원선, 동해선, 평부선 구간의 값이 크게 나타난다. 이 구간들은 북한 및 한반도 중심부에 위치한 구간들이다. 남한 내부에서의 연결 신뢰성 R_{ss} 는 동서축의 경전선 구간의 값이 가장 크고, 이어서 태백선 두 구간, 동해선, 경부선 네 구간, 영동선의 값이 크게 나타난다. 북한 내부의 연결 신뢰성 R_{nn} 는 평라선 다섯 구간, 백두산청년선, 만포선, 평남선, 강원선, 평부선 구간에서 높다.

<표 3-3> 연결 신뢰성 상위 10개 구간

순위	전체			남-북			남-남			북-북		
	구간	노선	R_{ALL}	구간	노선	R_{sn}	구간	노선	R_{ss}	구간	노선	R_{nn}
1	66	평라선	0.0848	66	평라선	0.0899	5	경전선	0.0396	66	평라선	0.1118
2	68	평라선	0.0182	70	경부선	0.0170	92	태백선	0.0295	78	평라선	0.0459
3	76	평라선	0.0176	36	경의선	0.0078	10	동해선	0.0287	81	백두산 청년선	0.0455
4	78	평라선	0.0173	65	강원선	0.0071	4	경전선	0.0253	76	평라선	0.0453
5	81	백두산 청년선	0.0172	68	평라선	0.0065	91	태백선	0.0209	73	만포선	0.0416
6	73	만포선	0.0160	43	강원선	0.0054	14	경부선	0.0196	68	평라선	0.0399
7	64	평라선	0.0136	35	경원선	0.0017	13	경부선	0.0160	64	평라선	0.0359
8	47	평남선	0.0120	28	동해선	0.0010	90	영동선	0.0157	47	평남선	0.0318
9	65	강원선	0.0117	76	평라선	0.0010	25	경부선	0.0134	65	강원선	0.0219
10	70	경부선	0.0099	38	평부선	0.0007	17	경부선	0.0131	49	평부선	0.0194



남북한 연결노선인 경의선, 경원선, 동해선의 연결 신뢰성 R_{ALL} , R_{sn} , R_{ss} , R_{nn} 는 다음과 같다. R_{ALL} , R_{sn} 기준으로 경의선, 경원선, 동해선 순으로 값이 크며, 이 결과는 남북한 통합 철도망의 연결성 측면에서 경의선이 동해선보다 더 중요한 것을 의미한다. 또한 세 노선은 남북한 연결노선 특성상 R_{ALL} 보다 R_{sn} 이 더 크고, R_{ss} 과 R_{nn} 는 모두 0으로 나타난다.

남북 연결구간 연결 신뢰성

		경의선	경원선	동해선
R_a	R_{ALL}	0.0037	0.0008	0.0005
	R_{ss}	0.0000	0.0000	0.0000
	R_{nn}	0.0000	0.0000	0.0000
	R_{sn}	0.0078	0.0017	0.0010

경의선, 경원선, 동해선의 연결 신뢰성 제고 효과 E_{ALL} , E_{sn} , E_{ss} , E_{nn} 는 다음과 같다. 연결 신뢰성 제고 효과 E 는 그 값이 0에 가까울수록 해당 구간의 존재가 전체 철도망의 연결 신뢰성을 높이는 효과가 있음을 의미한다.

남북 연결구간의 연결 신뢰성 제고 효과

		경의선	경원선	동해선
E_a	E_{ALL}	0.903	0.904	1.015
	E_{ss}	1.000	1.000	1.000
	E_{nn}	0.998	0.998	1.000
	E_{sn}	0.653	0.664	1.074

세 노선의 연결 신뢰성의 제고 효과는 경의선, 경원선, 동해선 순으로 크다. 이 결과는 철도망의 연결성 측면에서 중요도를 평가한 연결 신뢰성 결과와 일치한다. 또한 세 노선은 남북한 연결노선 특성상 남북한 전체 정류장간(E_{ALL})에서보다 남북한 정류장간(E_{sn})에서 연결 신뢰성 제고효과가 더 크게 나타난다. 한편 경의선과 경원선의 E_{nn} 가 1이 아닌 것은 최단경로가 남북한 연결노선을 이용하는 기종점 정류장 쌍이 있기 때문이다(예: 성산역-개풍역). 또한 동해선의 E_{ALL} 과 E_{sn} 값이 1 이상인 것은 다음 예시처럼 동해선이 없는 철도망에서 최단거리가 동해선이 있는 철도망에서 최단거리보다 길어서 다른 구간 예컨대 평라선 구간이 단절될 경우의 우회경로도 유효경로로 포함될 수 있기 때문이다.



이 연구는 남북한 통합 철도망에서 링크 치명도와 연결 신뢰성을 평가하고 남북교류에 중요한 링크를 식별하였다. 이를 통해 통일 이후 나타날 수 있는 장·단기적 교통체계의 변동성에 효율적으로 대비하기 위한 정보를 축적하였다. 링크 치명도 정보는 통행수요의 총 이동거리 증가 관점으로 남북한 통합 철도망의 중요 구간을 시사한다. 이 정보를 바탕으로 해당 링크에 대한 특별 관리방안을 마련하거나 남북한 통합 철도망의 링크 치명도를 분산하는 등의 취약성 개선 방안을 수립할 수 있다. 연결 신뢰성 정보는 철도망에 발생한 충격 상황에서 유효경로가 없는 출발역-도착역 쌍 개수의 비율에 관한 정보를 제공한다. 대안 경로가 부족한 철도망의 내재적 한계를 보완하고 견고한 철도망을 계획할 때 활용될 수 있다.

또한 링크 치명도 완화 효과와 연결 신뢰성 제고 효과를 측정하는 신규 지표를 제안하고 남북한 철도망 연결노선인 경의선, 경원선, 동해선을 대상으로 두 효과를 평가하였다. 이 결과에 의하면 경의선, 경원선, 동해선 순으로 남북한 통합 철도망의 링크 치명도 완화 및 연결 신뢰성 제고 효과가 큰 것으로 나타났다. 이 연구에서 제시된 링크 치명도 완화 효과와 연결 신뢰성 제고 효과 지표는 장래 철도사업 계획의 수립 및 우선순위 평가에 활용될 수 있을 것이다.

이 연구는 국내외 최초로 북한 철도망 분석 네트워크를 구축하였다. 하지만 매우 제한된 기초 자료와 예산으로 링크와 노드의 속성 정보가 충분히 구축되지 않았으며, 그 결과 정밀하고 과학적인 네트워크 분석의 제약요인이 되고 있다. 향후 북한 철도망 분석 네트워크를 고도화하여 남북한 통합 철도망 연구의 근간을 마련할 필요가 있다.

참고 문헌

- 국회예산정책처(2019), 북한 인프라 개발의 경제적 효과.
- 임재경(2007), 「북한 SOC 개발방안-남북 및 동북아 물류의 효율적 연계방안을 중심으로-」, 남북정상 회담 이후 남북경협에의 비전과 전망 세미나, 산업연구원.
- Berdica, K. (2002). An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done. *Transport policy*, 9(2), 117-127.
- Chen, A., Yang, H., Lo, H. K., & Tang, W. H. (2002). Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(3), 225-252. doi:[https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(00\)00048-5](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(00)00048-5).
- D'Este, G. M., & Taylor, M. A. P., (2003). Network vulnerability: an approach to reliability analysis at the level of national strategic transport networks. In: Iida, Y., Bell, M.G.H. (Eds.), *The Network Reliability of Transport*. Elsevier, Oxford, 23 - 44.
- Jenelius, E., Petersen, T., & Mattsson, L.-G. (2006). Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(7), 537-560.
- Wakabayashi, H., & Iida, Y. (1992). Upper and lower bounds of terminal reliability of road networks: an efficient method with Boolean algebra. *Journal of Natural Disaster Science*, 14(1).