WP 21-22

광역교통의 재난 및 사고에 대한 회복탄력성(Resilience) 평가 지표 연구

황진욱 국토연구원 부연구위원 (jhwang@krihs.re.kr)

KRIHS 국토연구원

차례

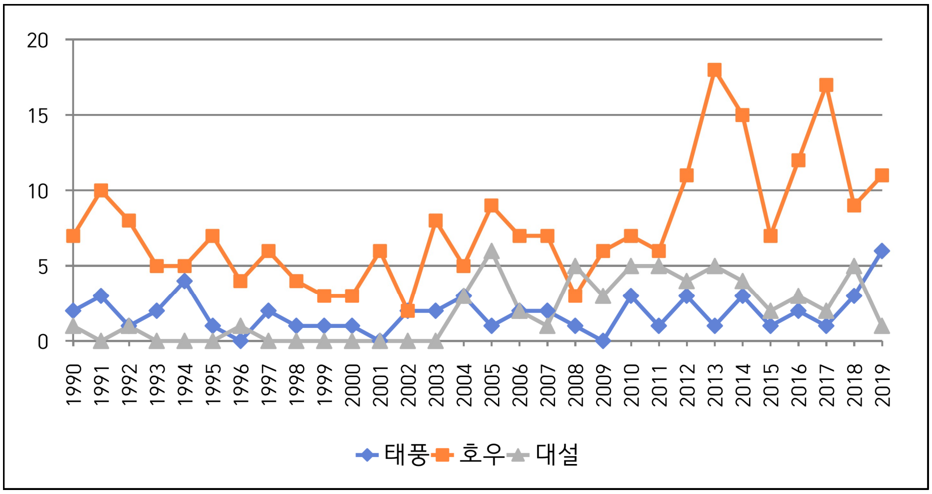
01 서론

1) 연구 배경 및 목적

■ 국토교통의 안정적인 운영·관리를 위협하는 위험의 종류가 다양해지고 발생빈도도 높아지고 있음

- 최근 20년(2000~2019년)간 전 세계적으로 기후변화에 따른 자연재해(홍수·태풍·가뭄·지진 등)의 발생빈도가 앞선 20년(1980~1999년)과 비교해 약 1.7배 증가함(UNDRR 2020)
- 장기적인 관점에서 우리나라도 호우·태풍·대설과 같은 기상이변에 따른 자연재해 빈도가 높아지는 추세이며, 이로 인한 재산피해액은 1960년대 1조 2,498억 원에서 2000년대 들어 20조 원을 돌파하며 비약적으로 증가함(국가지표체계 2021)

그림 1 연도별 자연재해 횟수(1990~2019년)



출처: 행정안전부, 자연재해현황(각 연도). https://www.index.go.kr/unify/idx-info.do?idxCd=4289 (2021년 12월 12일 검색).

- 이 밖에도 2019년부터 발생한 코로나19 감염병 확산으로 인해 예기치 못하게 대중교통 수요가 급감하는 등 교통서비스의 안정적 운영의 필요성 대두(〈표 1〉 참조)
  - 2020년의 전국 대중교통 이용 인원은 약 823만 명으로 2019년의 1,162만 명보다 29.2% 감소함(한국교통안전공단 2021)

표 1 지역별 대중교통 이용 인원 변화(2019~2020년)

(단위: 명)

구분	2019년	2020년	증감량	증감률
전체	11,627,915	8,235,011	-3,392,904	-29.2%
서울	4,418,869	3,295,972	-1,122,897	-25.4%
부산	1,061,218	755,854	-305,364	-28.8%
대구	500,344	285,446	-214,898	-43.0%
인천	786,063	547,445	-238,618	-30.4%
광주	218,677	139,922	-78,755	-36.0%
대전	256,699	169,340	-87,359	-34.0%
울산	141,626	92,606	-49,020	-34.6%
세종	28,298	20,319	-7,979	-28.2%
경기	3,001,019	2,159,097	-841,922	-28.1%
강원	94,315	55,231	-39,084	-41.4%
충북	115,259	69,423	-45,836	-39.8%
충남	169,062	109,302	-59,760	-35.3%
전북	120,673	81,279	-39,394	-32.6%
전남	124,186	86,759	-37,427	-30.1%
경북	165,064	88,515	-76,549	-46.4%
경남	343,605	220,951	-122,654	-35.7%
제주	82,940	57,551	-25,389	-30.6%

주: 대중교통 이용 인원은 지역 내 일반버스와 도시철도 이용자를 조사함.
출처: 한국교통안전공단 2021의 2019년과 2020년 이용 인원 자료를 바탕으로 저자 재작성.

- 이처럼 위험의 다양화로 인해 도로망 지·정체, 통행 차단, 도로 침수·유실·파손, 링크 단절 등 교통 네트워크 및 인프라의 정상적 관리와 운영이 어려워지는 경우, 국민의 이동권이 제한될 수 있으므로 적절한 대응체계와 선제적 대비책 마련이 필요함

■ 현재 우리나라의 경우 위험 발생 시 교통 인프라 및 서비스에 대한 단기적·구조적 대응방안 외 장기적·비구조적 대응방안에 관한 연구와 논의가 부족함

- 우리나라의 국가 공간계획체계 내 광역도시계획, 도시기본계획, 도시관리계획 등에서 방재·안전 계획수립을 규정하고 있으나, 교통 부문은 종합적 방재계획 체계가 부재하며, 대부분 도로 단위로 해당 도로의 관리 주체가 위험 상황 발생 시 물리적 복구 작업을 즉각적으로 수행하는 것이 일반적인 대응체계라 할 수 있음

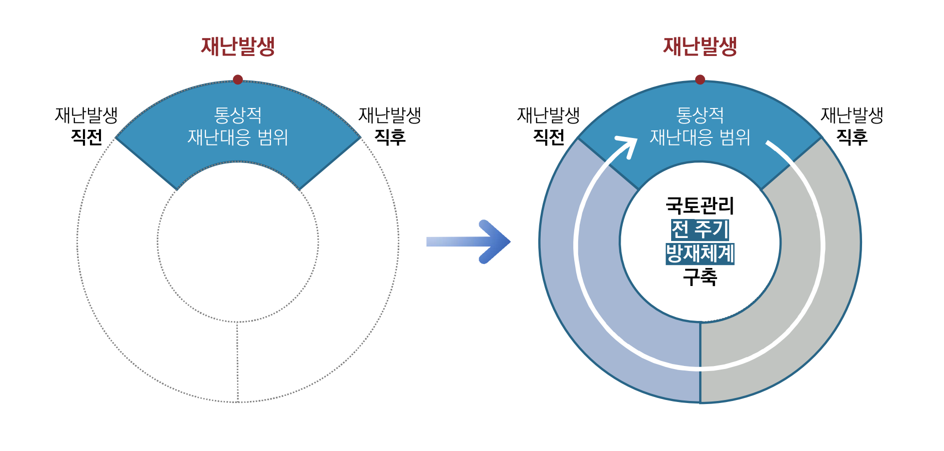
- 「재난 및 안전관리 기본법」에 따라 수립된 제4차 국가안전관리기본계획(2020~2024)에서

는 재난 상황별 국토교통부, 경찰청 등 책임 주체의 예방·대비·대응·복구대책을 규정하고 있으나, 교통·도로 통제 및 대체교통수단 확보와 기반시설의 물리적 복구에 초점이 맞춰져 있음(행정안전부 2019)

■ 한편 최근 수립된 제5차 국토종합계획(2020~2040)은 '안전하고 회복력 높은 안심국토 조성'을 위해 '국토관리 전(全) 주기 방재체계의 구축·이행'을 제시함

- 이에 따라 재난 발생 직전과 직후로 한정되는 통상적 대응 범위를 벗어나, 재난 상황을 견디고 시스템 운영의 변화를 통해 이에 적응하고 극복하는 전 과정을 아우르는 회복탄력성(Resilience)[1] 개념의 논의가 필요함

그림 2 국토관리 전(全) 주기 방재체계(시간적·공간적 확장) 개념도



출처: 국토교통부 2019, 101.

- 국토교통관리에서도 단순히 지자체의 관할구역 도로 관리를 넘어, 광역교통 단위에서 다양화된 위험 상황에 대한 회복탄력성 개념 도입을 통해 안전국토를 위한 재난·재해·사고 대응의 시간적·공간적 범위를 확장할 필요가 있음
  - 이 페이퍼에서 광역교통은 「대도시권 광역교통 관리에 관한 특별법」 제2조에서 정의하는 대도시권의 광역적 교통 수요를 처리하기 위해 둘 이상의 시·도에 걸치는 도로, 철도, 역사, 환승센터 등의 교통시설과 이를 이용하는 교통서비스를 의미함
  - 법령에서 정의하는 대도시권은 수도권, 대전·세종권, 대구권, 부산·울산권, 광주권 등 5개 권역이 있음

1) 이 페이퍼에서는 '레질리언스(Resilience)' 용어를 '회복탄력성'으로 번역하며, 문맥에 맞게 혼용함. 회복탄력성 개념에 대한 더 상세한 논의는 본 연구의 2장 참조.

■ 이 페이퍼에서는 교통 회복탄력성 평가 요인 및 지표에 관한 조사를 통해 시사점을 도출하고, 향후 우리나라의 광역교통 회복탄력성을 평가하는 방안을 제시하고자 함

- 광역교통의 회복탄력성은 교통생활권을 공유하는 대도시권역 단위로 평가한다고 가정하고, 적절한 평가 요인 및 지표에 대한 조사 및 연구를 수행함
- 이를 위해 먼저 국내·외 문헌조사를 통해 교통 회복탄력성의 개념을 정의하고, 교통 회복탄력성 평가에 관한 해외 사례 및 선행연구 고찰을 통해 시사점을 도출한 후, 향후 국내 광역교통 회복탄력성 평가를 위한 정책 방향을 제시하고자 함

02 교통 회복탄력성의 정의

1) 교통 회복탄력성(Transportation Resilience)의 개념

■ 회복탄력성의 다면적 특성 때문에 명확하게 통일된 개념은 없으나, 일반적으로 시스템 혹은 개인에게 가해지는 충격을 흡수하고, 적응하여, 회복하는 일련의 과정 혹은 이를 위한 능력을 묘사함

- 회복탄력성(Resilience)의 어원과 사전적 의미를 살펴보면 'To jump back' 또는 'Bouncing back,'즉, 이전상태로 되돌아가는 능력으로 해석할 수 있으나, 다양한 분야에서 나름의 개념 정의가 있음(국립방재교육연구원 방재연구소 2010)

표 2 연구 분야별 회복탄력성 정의

분야	정의
생태학	• 생태계 내에서 생태 변화나 교란을 흡수하고 변수 간 관계를 유지하여 시스템을 지속할 수 있는 능력(Holling 1973) • 시스템에 교란이 발생했을 때 시스템을 구성하는 요소와 기능들을 유지할 수 있도록 안정적 평형 상태로 변화하는 능력(Ludwig et al. 1997)
공학	• 시스템이 일시적 사고 후, 혹은 계속된 물리적 스트레스 상황에서도 운영을 지속할 수 있도록 안정된 상태를 유지하거나 회복할 수 있는 내재적 능력(Hollnagel 2006) • 기반시설이 재난의 피해 규모 및 기간을 줄이는 능력으로, 잠재적 피해의 예측, 충격 흡수, 적응, 신속한 회복 능력을 포괄함(National Infrastructure Advisory Council 2009)
의학·간호학	• 개인이 역경을 겪을 때, 그 이전 수준으로 회복할 수 있도록 상황에 적응하고 극복하는 능력(Garmezy 1993) • 최소한의 심리적·물리적 비용으로 목표를 성취할 수 있도록 스트레스에 건강한 방식으로 대응할 수 있는 능력(Epstein and Krasner 2013)
교육학·심리학	• 정신적·감정적·행동적 유연성과 외·내적 부담에 대한 적응을 통해 역경에 성공적으로 적응하는 과정과 그 결과(American Psychological Association n/d) • 개인에게 닥친 역경에 긍정적으로 적응하는 과정 혹은 현상(Luthar et al. 2000)

출처: 각 참고문헌을 바탕으로 저자 작성.

- 회복탄력성의 개념 정의는 연구 대상(시스템 혹은 개인)에 따라 조금씩 다르며, 회복탄력성 자체의 다면적 특성으로 인하여 연구 분야마다 다양한 해석이 존재함

- 교통 연구 분야에서도 명확히 통일된 개념은 없으나, 회복탄력성의 일반적인 개념을 바탕으로 분석단위에 따라 전체 교통 시스템·네트워크의 포괄적인 교통 회복탄력성에 관한 연구도 있고 육상교통, 해상교통, 항공교통 등 특정 교통수단과 시설에 관한 연구도 있음(Wan et al. 2018; Zhou et al. 2019)

표 3 교통 분야의 분석 단위별 회복탄력성 정의

분석단위	정의
교통 시스템·교통망 (system·network)	• 교통 시스템이 손상을 입을 가능성이 있는 상황을 경험하고 상황 발생 후 적절한 시간 내에 강건한 운영 상태로 복귀할 수 있는 능력(Chan et al. 2016) • 교통 시스템이 위험 상황을 예측하고 대비하며 변화된 상황에 적응하고 견디는 과정을 통해 상황에 대응하고 빠르게 회복하는 능력(Federal Highway Administration 2014) • 교통망이 기상이변으로 인한 충격을 견디고, 충격으로 인한 영향에 맞서 운영하여 빠르게 회복하는 역량(Department for Transport 2014) • 교통망이 위험 상황에 의한 충격을 문제없이 흡수하고 합리적인 시간 내에 이전 수준 혹은 그 이상의 서비스 수준(LOS)으로 복구하는 능력(Freckleton et al. 2012)
육상 대중교통 (버스, 철도 등)	• 대중교통 시스템이 위험 상황에서도 핵심 기능을 제공하고 충격에서 빠르게 회복하거나 상황을 변화시키는 능력 혹은 기상이변 상황이나 다른 위험 상황에 대비해 견디고 회복할 수 있도록 잘 준비된 상태(National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2017) • 대중교통 서비스 제공에 필요한 인프라와 서비스 수준을 재난 이전 수준으로 빠르게 복구하는 능력(Mudigonda et al. 2019)
해상교통	• 시스템이 충격을 흡수하고 기존의 서비스 수준 혹은 그와 유사한 수준으로 회복하는 능력(Omer et al. 2012) • 해상교통 시스템이 재난 상황에서 견디고 적응하여 평상시의 안정적인 운영 상태로 회복하는 능력(Dui et al. 2021)
항공교통	• 항공교통 네트워크가 위험 상황으로 인한 충격을 견디고 필요한 안전수준에서 운영을 유지할 수 있는 능력(Janic 2015)

출처: 각 참고문헌을 바탕으로 저자 작성.

2) 광역교통 회복탄력성의 정의

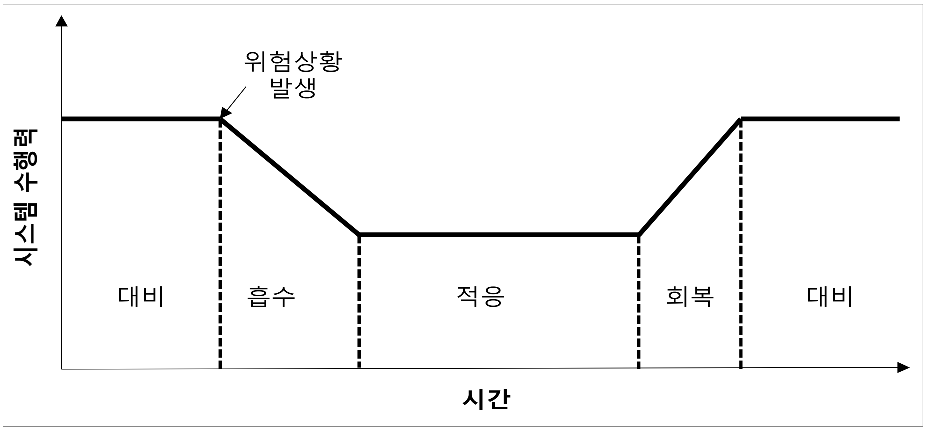
■ 이 페이퍼의 목적에 따라 복합적 교통수단과 교통시설을 포괄하는 광역교통의 관점에서 교통 회복탄력성의 개념에 관한 선행연구와 사례를 살펴보면, 대체로 기후변화에 의한 자연재해 혹은 사고로 인해 발생할 수 있는 교통 시스템·네트워크의 장애 상황에 대비하고, 변화된 상황에 적응하는 능력과 더불어 시스템이 상황 발생 전의 상태로 회복하는 능력을 강조

■ 선행연구를 바탕으로 이 페이퍼에서는 광역교통 회복탄력성을 '광역교통 수단과 시설을 포괄하는 교통 시스템이 직·간접적 충격에 의한 위험 상황을 대비하고, 충격을 흡수하여 변화된 상황에 적응하는 과정을 통해 손상된 수행력(performance)을 회복하는 능력'으로 정의함

- 교통 시스템에 가해질 수 있는 충격은 교통수단, 교통시설, 공급자, 이용자 등 시스템 내부적 요인에 문제가 생겨 발생하는 직접 충격과 기상이변, 자연재해 등 시스템 외부적 요인에 의한 간접 충격으로 구분할 수 있음(Mattsson and Jenelius 2015; 정연식 외 2012)
  - 예를 들어 직접 충격은 교통사고, 도로유실, 기술적 장애, 노조 파업 등이 있고, 간접 충격은 폭우, 폭설, 태풍, 홍수, 지진, 테러, 화재 등을 포함하며, 직·간접적 충격으로 인한 위험 상황은 인명 피해, 교통혼잡, 이동성 제약, 물류 운송 장애 등이 있음(Mattsson and Jenelius 2015; 정연식 외 2012)[2)]
- 교통 회복탄력성의 시스템적 특성과 더불어 시간적 범위를 설명하기 위해 본 연구에서는 회복탄력성을 대비, 흡수, 적응, 회복의 4단계로 구분함(〈그림 3〉 참조)
  - 대비 단계는 위험 상황 발생 전후에 향후 발생할 충격의 영향을 감소시키기 위해 시스템의 회복탄력성을 강화하는 과정을 의미함(Jin et al. 2014; Wan et al. 2018)
  - 충격의 흡수 단계는 충격을 견디거나(withstand, resist 등) 충격에도 기능을 유지하는(maintain, survive 등) 상태 등으로 설명할 수 있음(Zhou et al. 2019; 정동재 외 2016)
  - 적응 단계는 시스템이 위험 상황에 대응하여 달라진 환경에서 기능하기 위해 동적으로 변화하는 과정을 의미함(Dalziell and McManus 2004; Wan et al. 2018)
  - 회복 단계는 시스템이 적응 단계를 거쳐 위험 상황 발생 이전의 수준 혹은 일정 수준으로 시스템의 수행력을 복원하는 과정을 의미함(Adams et al. 2012; Bešinović 2020; Zhou et al. 2019)

2) 정연식 외 2012의 연구에서는 교통 시스템에 가해지는 충격을 "1차 교통재난", 충격으로 인한 위험 상황을 "2차 교통재난"으로 정의함.

그림 3 **광역교통 회복탄력성의 개념도**



출처: Bešinović 2020을 참조하여 저자 작성.

03 교통 회복탄력성의 평가 방법과 사례

1) 교통 회복탄력성 평가 방법

■ 교통 회복탄력성의 평가 방법은 정성적 평가와 정량적 평가로 구분할 수 있으며, 이 페이퍼에서는 광역교통 시스템의 광범위성과 향후 개발될 평가 지표 활용의 용이성 및 확장성을 고려하여 교통 회복탄력성의 단계별 속성에 기반한 요인 개발과 정량화 방법에 중점을 둠

- 교통 회복탄력성의 정성적 평가를 위한 요인의 개념 정립 및 개발에 관한 연구가 상당수 수행됐으며, 비교적 최근 정성적 평가를 통해 개발된 요인을 정량화하는 방법론이 논의되고 있음(Gu et al. 2020)
- 교통 회복탄력성의 정성적 평가 연구에서는 시스템의 회복탄력성을 설명하는 특성이나 능력 등을 활용하여 평가 요인을 개발한 경우가 많고, 이를 정량화하는 방법에는 교통망의 위상 분석(topology analysis), 교통 시스템의 속성기반 분석(attribute-based analysis), 수리적 모형(mathematical-model)이나 시뮬레이션 기법을 활용한 수행력 최적화 분석(performance-optimization analysis), 교통량 데이터 기반 분석(traffic-data driven analysis) 등이 논의됨(Pan et al. 2021; Zhou et al. 2019)
- 일반적으로 수행력 최적화 분석은 단일 교통수단이나 소규모의 교통 시스템을 평가하는 데 적합하고, 광역교통 시스템과 같은 대규모의 교통 시스템 평가에는 위상 분석이나 속성기반 분석이 적합함(Leobons et al. 2019; Zhou et al. 2019)

■ 대표적인 교통 시스템 회복탄력성 평가 도구는 Tierney and Bruneau(2007)가 제시한 'R4 평가틀(Framework)'이 있음

- Tierney and Bruneau(2007)는 지진 재난 연구원 MCEER(Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research)의 연구진들이 제시한 강건성(Robustness), 예비성(Redundancy), 가용성(Resourcefulness), 회복속도(Rapidity) 등, 지진 발생 시 시스템의 회복탄력성을 설명하는 속성 4가지(R4 Framework)를 교통 시스템에 적용함
- 강건성은 교통 시스템이 위험 상황을 견딜 수 있는 능력, 예비성은 위험 상황 시 기능을

상실한 부분을 대체할 수 있는 경로와 교통수단, 가용성은 손상된 기능을 복구할 수 있는 물질적·인적 자원, 회복속도는 앞선 속성들의 강화를 통해 교통 시스템의 기능 복구에 걸리는 시간으로 측정 가능함

2) 해외의 교통 회복탄력성 평가 사례

■ 교통 회복탄력성을 평가한 해외 사례 중 대부분은 R4 평가틀에서 제시한 지표를 기본으로 평가 대상이 되는 교통수단 혹은 교통망의 특성과 상황에 맞게 지표를 보완하는 경우가 많음

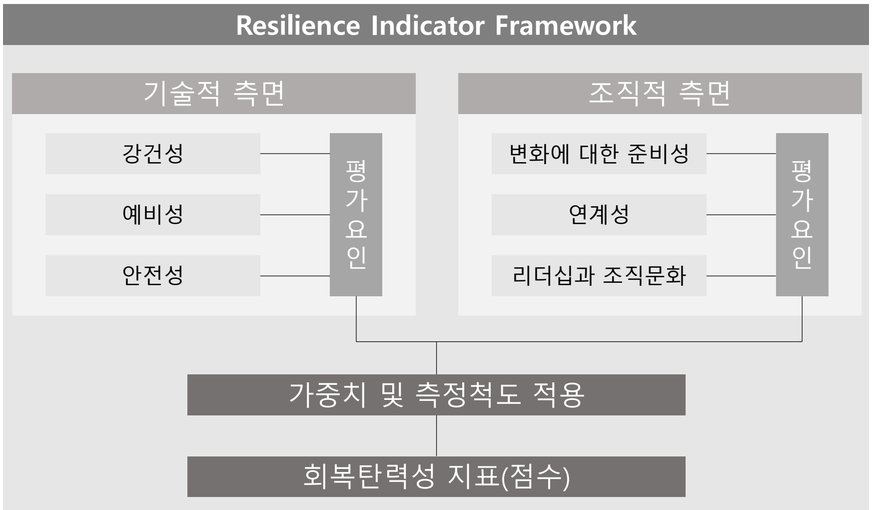
- 이 페이퍼에서는 미국, 유럽, 뉴질랜드의 사례를 통해 실제 교통 회복탄력성 평가 방법을 조사함

■ 미국 캘리포니아주 로스앤젤레스(Los Angeles, California) 대도시권역에서 운행하는 대중교통 기관인 라 메트로(LA Metro)는 자체적으로 '회복탄력성 지표 체계(Resiliency Indicator Framework, 이하 RIF)'를 개발하여 권역 내 대중교통 시스템의 기후 변화 대응 회복탄력성을 평가함[3)]

- RIF는 크게 기술적 측면과 조직적 측면에서 대중교통 시스템의 회복탄력성을 평가함
  - RIF의 기술적 측면에서는 주로 대중교통 시스템이 적정 수준의 서비스를 제공할 수 있는 물리적 능력에 중점을 두고, 조직적 측면에서는 기관의 재난·재해 대응 관련 의사결정 및 계획수립 능력, 타 기관과의 연계, 재정 상황 등을 평가함
- 회복탄력성을 평가하기 위해 RIF는 강건성(robustness), 예비성(redundancy), 안전성(safe to fail), 변화에 대한 준비성(change readiness), 연계성(network), 리더십과 조직문화(leadership and culture) 등 6가지 기본 속성과 이에 상응하는 평가 요인들을 제시하며, 요인별 가중치와 측정 척도(1~4점)를 적용하여 회복탄력성 지표를 개발함(〈그림 4〉 참조)

3) 이하 관련 내용의 출처는 Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority 2015.

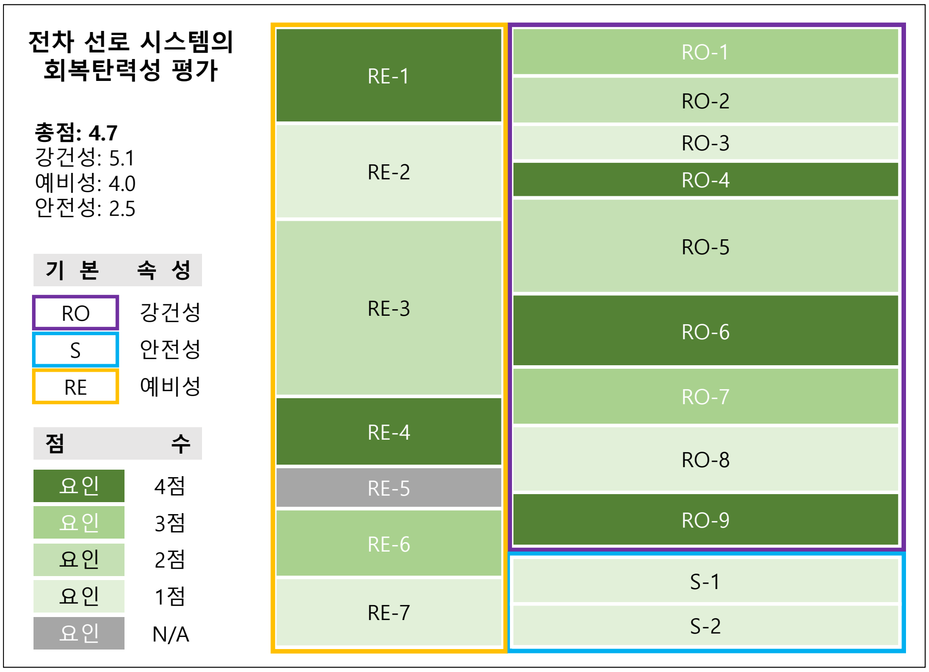
그림 4 라 메트로(LA Metro) 회복탄력성 지표 체계(Resilience Indicator Framework) 개념도



출처: Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority 2015를 참조하여 저자 작성.

- 기본 속성과 상응하는 평가 요인의 예를 들면, 기술적 측면의 강건성에는 유지·보수, 설계, 복구 비용 등을 평가하는 요인들이 있으며, 예비성에는 대체 경로와 대체 수단의 가용성 및 수용력, 부품과 장비의 대체 가능성 등이 있음
- 라 메트로(LA Metro)의 실제 평가 사례를 보면 버스 노선의 개별 정류장, 특정 구간의 버스 노선, 전차 선로 시스템(Overhead Catenary System), 버스·전차 차고, 전철역의 통신 시스템 등 기관이 운영·관리하는 대중교통 시스템의 요소를 대상으로 회복탄력성을 평가함(〈그림 5〉 참조)
- 요인별 점수를 정량화함으로써 기관은 회복탄력성 강화를 위해 필요한 부분을 분석하여 우선순위를 결정하는 등 향후 정책 방향을 결정하는 데 근거로 활용 가능함

그림 5 라 메트로(LA Metro)의 회복탄력성 평가 지표 적용 예시



주 1) 기술적 측면의 기본 속성(강건성, 안전성, 예비성)과 연관된 평가 요인만 점수화했으며, 그림에서 각 요인의 면적은 적용한 가중치에 비례함. 회복탄력성 총점은 10점 만점 기준.
2) RO: 강건성(Robustness), S: 안전성(Safety), RE: 예비성(Redundancy)

출처: Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority 2015를 참조하여 저자 작성.

■ 유럽연합(EU)이 교통 회복탄력성 강화를 위해 진행한 프로젝트 중 하나인 FORESEE(FOr RESilient transport networks against Extreme Events)는 교통 인프라의 서비스 수준과 회복탄력성을 측정하는 지침을 제시함[4)]

- FORESEE 프로젝트에서 회복탄력성은 재난 상황이 닥쳐도 서비스를 지속적으로 제공할 수 있는 능력을 의미하며, 재난 상황으로 인한 충격을 '흡수'하는 단계와 이를 극복하고 피해를 복구하는 '회복' 단계로 구분함
- 본 프로젝트에서는 교통 시스템의 회복탄력성 결정요인(indicator)을 이용하여 간접적으로 평가하는 방법(〈표 4〉 참조)과 교통 시스템을 구성하는 인프라가 기상이변에 따른 위험 상황에서 제공할 수 있는 서비스 수준, 피해 규모, 복구 비용 등을 이용하여 직접적으로 회복탄력성을 평가하는 방법(〈그림 6〉 참조)을 제시함

4) 이하 관련 내용의 출처는 Adey et al. 2019.

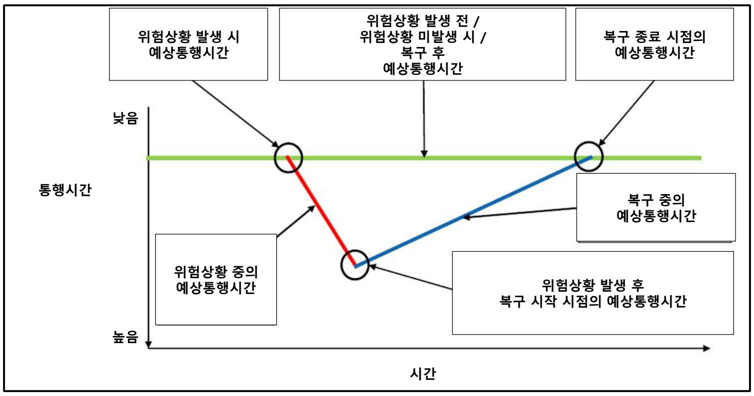
- 회복탄력성의 간접 평가를 위한 회복탄력성 결정요인은 인프라·환경·조직 등 교통 시스템을 구성하는 부분별로 개발할 수 있으며, 요인을 정량화하는 평가 방안도 제시하는 것이 바람직함
- 직접 평가 방법에서 서비스 수준은 통행 시간을 측정 요인으로 사용하고, 피해 규모는 부상자·사상자 수로 측정하며, 평시와 위험 상황 시를 비교하여 회복탄력성을 평가함

표 4 FORESEE 프로젝트의 간접적 회복탄력성 평가를 위한 요인 예시

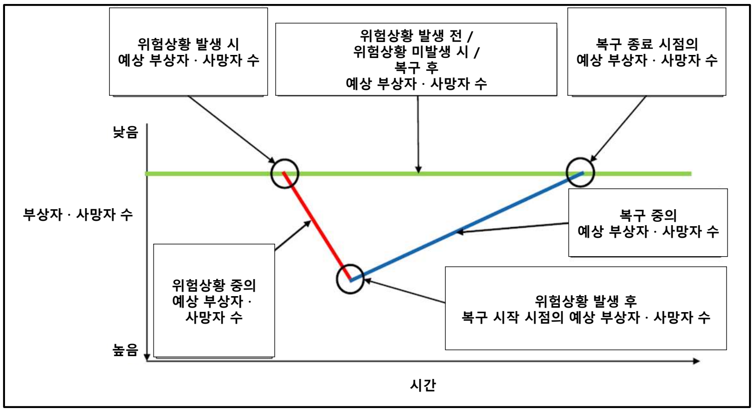
구분	회복탄력성 단계	요인	점수	평가 척도
인프라	흡수	재난 대응 디자인	1~5점	해당 인프라의 재난 대응 설계 부합도
	흡수	유지·보수 상태	1~5점	해당 인프라의 유지·보수 상태
환경	흡수	재난 위험 지역	1~5점	해당 인프라가 위치한 지역의 재난 발생 가능성
조직	회복	법·규정 체계	1~3점	재난 발생 시 복구 작업 시행을 위해 거쳐야 할 법적 절차
	회복	모니터링 주기	1~4점	재난 대응 안전 점검 주기
	회복	재난 대응 계획 수준	1~3점	재난 대응 계획의 수립 여부와 계획의 질적 수준

출처: Adey et al. 2019을 바탕으로 저자 작성.

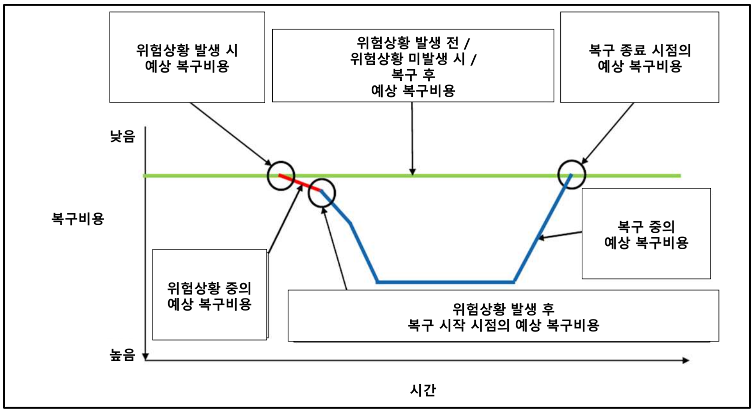
그림 6 **FORESEE 프로젝트의 직접적 회복탄력성 평가 방법**



(1) 통행시간 이용



(2) 부상자·사상자 수 이용



(3) 복구 비용 이용

출처: Adey et al. 2019을 바탕으로 저자 작성.

■ 뉴질랜드 매시대학교(Massey University) 연구팀은 교통 회복탄력성 평가 지표틀(Transport Resilience Indicator Framework, 이하 TRIF)을 개발하여 뉴질랜드 북섬에 위치한 마너와투–왕거누이(Manawatu–Wanganui) 지역 교통 인프라의 회복탄력성을 평가함[5)]

- 마너와투–왕거누이 지역은 2004년 홍수와 2011~2012년 산사태로 인해 지역 간 교통이 한동안 마비되는 등 자연재해로 인해 교통 인프라가 피해를 볼 확률이 높은 지역임
- 이 연구팀은 해당 지역의 도로와 철도 인프라의 회복탄력성을 평가했으며, 이를 위해 공학, 생태학, 사회학, 경제학, 제도, 서비스 등 다양한 관점의 평가 지표로 이뤄진 TRIF를 제시함(〈표 5〉 참조)

표 5 뉴질랜드 매시대학교 연구팀이 제시한 교통 회복탄력성 평가 지표

구분	평가 지표
공학	• 강건성(Robustness): 인프라 설계의 위험 상황 대응 내구성 및 안전수준 • 강화/대체(Retrofitting/Replacement): 재해 발생 위험 지역에 위치한 인프라의 안전 점검 수준과 교체 혹은 강화 가능성 • 신속성(Rapidity): 재해로 인한 물리적 피해를 복구하는 데 걸리는 시간
교통서비스	• 예비성(Redundancy): 위험 상황 발생 시 선택할 수 있는 대체 이동 수단 및 경로
생태계	• 환경영향의 최소화: 인프라 건설과 복구가 주변 환경과 생태계에 미칠 악영향 분석 및 최소화 방안 마련 능력
사회적	• 취약계층 긴급대피로 확보: 위험 상황 발생 시 노약자 등 교통 취약계층의 대피 계획수립 여부 • 사회 복지 서비스의 접근성: 위험 상황 발생 시 교통 취약계층의 의료·보건 등 각종 사회 복지 서비스 접근성 확보 능력
경제적	• 운송·물류 서비스의 지속성: 위험 상황 발생 시 화물 운송 서비스가 지속될 수 있도록 대체 경로 및 수단 확보 능력
제도적	• 타 기관과의 협력: 교통 기관의 타 기관과 협력 가능성 및 연계 능력 • 자원의 효율적 분배: 물적·재정적 자원이 피해 복구를 위해 효율적이고 신속하게 분배·집행될 수 있도록 하는 행정적 절차 수립 여부

출처: Imran et al. 2014를 바탕으로 저자 작성.

- 매시대학교 연구팀은 주로 문헌 연구와 관계자 인터뷰 등 정성적 데이터를 이용하여 분야별 평가 지표를 개발했으며, 재해로 인한 인프라의 물리적·재정적 피해 규모, 통행량 감소율 등 관련 정량적 데이터를 보조 지표로 사용해 지역 교통 인프라의 회복탄력성을 평가함
  - 다른 나라의 사례들과는 달리 정량적 데이터를 보조적 지표로만 사용하여 해당 지역의 교통 회복탄력성을 수치화하는 과정은 생략됨

5) 이하 관련 내용의 출처는 Imran et al. 2014.

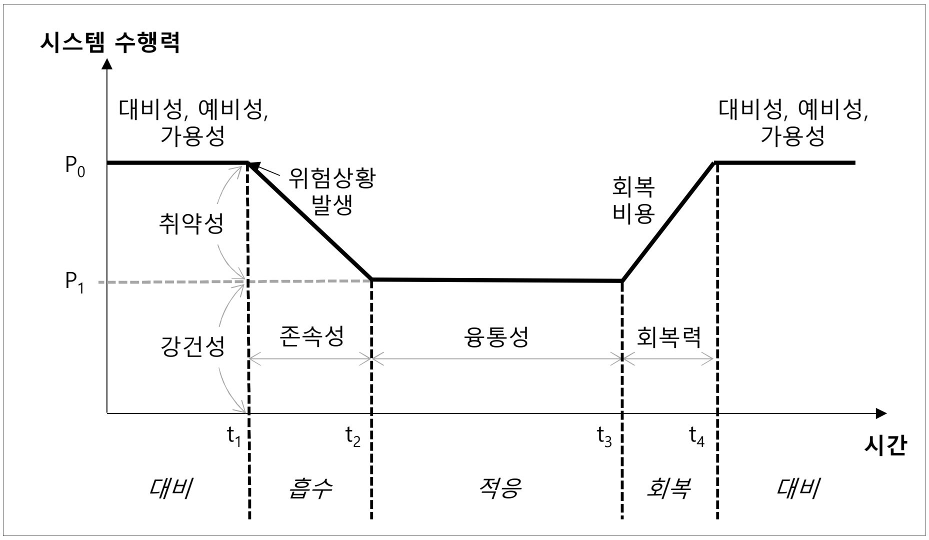
04 광역교통 회복탄력성의 평가 방법

■ 앞서 살펴본 해외의 교통 회복탄력성 평가 사례에서는 단일 교통망 혹은 단일 교통수단의 회복탄력성을 평가하였으며, 다양한 측면에서 평가 지표를 개발함

■ 본 연구에서 중점을 두고 있는 광역교통의 관점에서는 해외 사례에서 사용한 교통 회복탄력성의 평가 지표를 그대로 사용하기보다는 복합적 교통수단과 교통시설을 포함하는 광역교통의 특성을 고려한 평가 방법과 지표 선정이 필요할 것으로 판단됨

- 이 페이퍼에서는 기존의 R4 속성을 회복탄력성 단계별로 구분하고, 추가적인 문헌 연구를 통해 향후 체계적인 회복탄력성 평가 지표 개발과 지표 활용의 유연성 확보를 위해 대비성(Preparedness), 취약성(Vulnerability), 존속성(Survivability), 융통성·적응성(Flexibility·Adaptability) 등의 속성을 단계별 평가 요인으로 추가함(〈그림 7〉 참조)

그림 7 교통 회복탄력성 평가 지표의 단계별 분류



출처: 저자 작성.

- 이때, 취약성, 존속성, 융통성, 회복 시간, 회복 비용은 측정치가 적을수록, 강건성, 대비성, 예비성, 가용성은 측정치가 클수록 교통 시스템의 회복탄력성이 높다고 평가함

- 즉, 다음과 같은 속성을 지닌 교통 시스템은 회복탄력성이 높음
  - (대비성) 교통 시스템이 위험 상황에 대응할 수 있는 계획과 교육 프로그램이 있음
  - (예비성) 권역 내 제공할 수 있는 교통서비스 및 경로가 다양함
  - (가용성) 위험 상황 발생 시 대응을 위해 투입 가능한 인력과 재원이 풍부함
  - (취약성·강건성) 위험 상황으로 인한 피해에도 수행력의 저하가 적음
  - (존속성) 이후 일정 수준의 수행력을 유지할 수 있을 때까지 걸리는 시간이 짧음
  - (융통성·적응성) 위험 상황에 적응하여 저하된 상태로 유지된 수행력의 회복을 시작할 때까지 걸리는 시간이 짧음
  - (회복력, 회복 시간) 평시 수준의 수행력으로 회복하는 데 걸리는 시간이 짧음
  - (회복 비용) 가용성 중 실제 회복 과정에서 소요되는 재원의 규모가 작음

■ 문헌 연구의 결과로, 본 연구에서는 〈표 6〉과 같이 광역교통 회복탄력성의 단계별 주요 평가 지표를 선정하고 각 요인의 개념과 정량화 방안을 제시함

- 〈표 6〉에 정리된 평가 지표 외에도 피해 복구 과정이나 추가 인프라 건설이 주변 생태계와 환경에 미치는 영향, 위험 상황 발생 시 지역 사회 취약계층의 이동권 보장, 전염병 발생 시 교통수단의 위생 및 방역 수준 등 상황에 따라 다양한 평가 지표를 추가하여 평가틀을 확장할 수 있음

- 향후 연구를 통해 평가 지표의 가중치 산정 등 평가틀을 보완 및 수정하기 위한 추가적인 논의 과정이 필요할 것으로 보임

표 6 교통 회복탄력성의 단계별 주요 평가 지표의 개념과 측정방안

단계	평가 지표	개념	측정방안[주)]
대비	대비성 (Preparedness)	위험 상황 발생 전 잠재적 피해를 예측하여 피해 저감 실행계획 수립, 관련 장비 구비, 교육 및 훈련 등을 통해 교통 시스템의 회복탄력성을 강화하는 능력(Federal Highway Administration 2014; Jin et al. 2014; Wan et al. 2018)	• 위험 상황 발생 시 교통 분야의 피해 대응 및 저감 계획 수립 여부 • 위험 상황 대응 교통 분야 교육 및 훈련 프로그램 개발 여부
	예비성 (Redundancy)	경로 혹은 교통수단의 다양성을 의미하며, 교통 시스템이 위험 상황 발생 시 손상된 부분을 대체하여 기능을 수행할 수 있는 능력(Leobons et al. 2019; Omer et al. 2012; Tierney and Bruneau 2007; Wan et al. 2018; Zhou et al. 2019)	• 권역 내에서 기·종점을 연결하면서 교차하지 않는 경로 및 대중교통수단의 개수
	가용성 (Resourcefulness)	위험 상황 발생 후 교통 시스템의 기능 회복을 위해 필요한 물리적·경제적·인적 자원의 가용 수준(Tierney and Bruneau 2007; Wan et al. 2018; Zhou et al. 2019)	• 위험 상황 발생 시 대응을 위해 투입 가능한 재원 규모 및 인력 수
흡수	취약성 (Vulnerability)	교통 시스템이 위험 상황으로 인해 피해를 보아 수행력이 저하된 정도(Berdica 2002; Bešinović 2020; Zhou et al. 2019)	• 평시 수행력과 위험 상황 발생 후 저하된 수행력의 차이(P_0 – P_1)
	존속성 (Survivability)	교통 시스템이 위험 상황 발생 이후 일정 수준의 수행력을 유지할 수 있을 때까지 저하된 수준의 서비스를 제공할 수 있는 능력(Bešinović 2020; Wan et al. 2018)	• 위험 상황 발생 직후부터 일정 수준의 수행력을 유지 가능한 시점까지 걸린 시간(t_2 – t_1)
	강건성 (Robustness)	교통 시스템이 위험 상황으로 인한 피해를 견디면서 유지할 수 있는 수행력의 정도(Tierney and Bruneau 2007; Zhou et al. 2019)	• 위험 상황 발생으로 인해 저하된 수행력(P_1)
적응	융통성·적응성 (Flexibility·Adaptability)	교통 시스템이 내부 메커니즘을 조정하거나 가용자원을 재배치하는 등 변화된 상황에 적응하여 위험 상황에 의한 피해로 저하된 수행력을 일정 수준에서 유지하는 능력(Cox et al. 2011; Wan et al. 2018)	• 위험 상황 발생 후 일정 수준의 수행력을 유지하는 시점부터 수행력을 회복하기 시작하는 시점까지 걸린 시간(t_3 – t_2)
회복	회복력·회복시간 (Recoverability·Rapidity)	교통 시스템이 위험 상황으로 인해 저하된 수행력을 정상적 운영이 가능한 수준으로 회복하는 능력 혹은 회복하는 데 필요한 시간(Baroud et al. 2014; Tierney and Bruneau 2007; Wan et al. 2018)	• 위험 상황 발생으로 인해 저하된 수행력을 평시 수준으로 회복하는 데 걸리는 시간(t_4 – t_3)
	회복 비용 (Recovery Cost)	수행력의 회복 과정에서 소요되는 경제적 비용(Vugrin et al. 2014; Zhou et al. 2019)	• 가용자원 중 실제 회복 과정에서 사용된 재원 규모

주: 수행력(P)과 시간(t)의 경우 〈그림 7〉 참조.
출처: 각 참고문헌을 바탕으로 저자 작성.

■ 이 페이퍼에서 광역교통 회복탄력성은 교통생활권을 공유하는 대도시권역 단위로 평가하므로 선정된 회복탄력성 평가 요인 및 지표를 광역교통 시스템에 적용하려면 권역 내 적절한 구역 구분이 필요함

- 선행연구에서 제시한 교통 회복탄력성 평가 요인 및 지표의 정량화 방안은 대부분 단일 교통수단 혹은 단일 교통망을 대상으로 하므로 지역 혹은 권역 단위의 교통 시스템을 평가하기에는 한계점이 있음

- 따라서 본 연구에서는 선정된 광역교통 회복탄력성 평가 지표의 정량화 시, Leobons et al.(2019)가 개발한 도시 교통 시스템의 회복탄력성 평가 방법을 바탕으로 권역 내 기·종점 혹은 특정 구역 간 교통수단 및 경로를 기준 단위로 교통 회복탄력성을 측정한 후 권역의 총 평균치를 계산하는 방안을 제안함
  - Leobons et al.(2019)는 Allen et al.(1993)가 개발한 지역별 접근성 평가 방법에 기반하여 〈수식 1〉과 같이 지역 교통 시스템의 회복탄력성 평가 방법을 제시함

수식 1 지역 단위 교통 시스템의 회복탄력성 정량화 방안

$$R_i = \frac{\sum_{j \neq i}^{N} R_{ij}}{N-1} \qquad R_A = \frac{\sum_{i}^{N}\sum_{j}^{N} R_{ij}}{N(N-1)}$$

여기서, R_{ij} : 구역(혹은 기점) i와 구역(혹은 종점) j 사이의 상대적 회복탄력성

R_i : 구역 i의 회복탄력성

R_A : 권역 A의 회복탄력성

N : 권역 내 구역의 수

출처: Leobons et al. 2019를 참고하여 저자 작성.

- 대도시권역 중 하나인 대전·세종권을 예로 들면, 권역을 대전시와 세종시로 나눌 수 있고 각 시의 행정구역(예: 시·군·구 혹은 읍·면·동)을 기준 단위로 선정된 지표의 정량화 후 구역 간 교통 회복탄력성 점수를 측정할 수 있으며, 구역의 점수를 바탕으로 해당 권역의 교통 회복탄력성을 측정할 수 있을 것으로 판단됨

03 결론 및 정책제언

1) 광역교통 회복탄력성 평가 지표 활용방안

■ 사례조사와 문헌 연구를 통해 교통 회복탄력성의 정의 및 평가 방법을 살펴보고, 이를 토대로 광역교통의 회복탄력성 평가 지표 개발 방안을 제시하였음

- 해외에서도 교통 회복탄력성 개념에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 미국, 유럽, 뉴질랜드 등의 국가들은 대중교통 서비스, 도로·철도 인프라 등 교통 시스템의 회복탄력성을 평가하여 기후변화에 대응하고자 노력하고 있음

■ 우리나라도 교통 방재 정책 수립 시, 다양화된 위험 상황에 대응하기 위한 장기적·비구조적 전략개발을 위해 교통 회복탄력성 평가와 이를 활용한 종합적 교통 방재체계 구축을 고려할 필요가 있음

- 서론에서 언급한 바와 같이 현재 우리나라의 국가교통 방재체계는 도시계획, 국가안전관리기본계획, 국가교통안전기본계획 등에 산재하여 있으며 다양한 교통 인프라와 위험 상황을 종합적으로 관리할 수 있는 시스템이 부재한 실정임
  - 대부분 도로를 중심으로 관리 주체가 위험 상황 발생 시 물리적 복구 작업을 수행하거나 도로 통제 및 대체교통수단 확보 등 즉흥적 대응에 집중하고 있음
  - 특히 재난 발생 시 위험 상황을 관리할 수 있는 절차나 단계별 대응 방안 및 이를 통제할 수 있는 지휘 조직과 협조체계 등 교통재난을 전담하여 종합적으로 대응·관리할 수 있는 장기적 계획 체계가 마련되어 있지 않음(정연식 외 2012)
  - 「도시교통정비 촉진법」에 따른 교통영향평가는 인프라 설치에 따른 교통 수요와 교통 혼잡에 대한 평가에 집중되어 있으나, 향후 범위를 확장하여 교통 시스템 전반의 회복탄력성 평가 등을 통해 체계적이고 주기적인 대응 전략 수립과 점검이 이뤄질 필요가 있음
- 따라서 기존의 단기적·구조적 대응방안을 벗어나 교통 인프라 및 서비스를 포괄하면서 장기적·비구조적으로 위험 상황에 대응할 수 있는 교통 방재체계의 수립이 필요하며, 이 페이퍼에서 논의한 교통 회복탄력성의 개념과 지표를 활용한 평가 방안은 이를 위한 전략 마련에 도움이 될 것으로 예상됨
  - 교통 회복탄력성 평가 지표는 해당 지역의 인프라와 교통수단, 교통 정책 등 교통 시스템을 구성하는 요소별 개발이 가능함

- 이를 통해 도로나 철도 등 물리적 인프라의 방재 설계에서부터 위험 상황 발생 시 교통 약자의 이동권 보장 등 교통 시스템의 사회적 영향까지 아우르는 종합적 평가가 이루어질 수 있음
- 또한 회복탄력성의 특성상 단계별 지표 평가가 필요하며, 이는 위험 상황 발생 시점뿐만 아니라 그 이전의 대비 단계와 이후의 회복 단계까지 포함하는 장기적 방재체계 수립을 위한 근거로 활용할 수 있음

■ 장기적 관점에서 회복탄력성의 개념을 활용한 종합적 교통 방재체계 구축은 2019년 수립된 제5차 국토종합계획에서 제시한 ‘국토관리 전(全) 주기 방재체계의 구축 및 이행’을 위한 국토교통 부문 전략으로 활용 가능성이 큼

- 기존의 국토교통 방재체계는 시간적으로 재난 발생 직전과 직후에 국한되어 있으며, 공간적으로는 재난 발생 지점과 주변 피해구역으로 한정되어 있음
- 광역교통 시스템의 회복탄력성 지표 개발과 이를 활용한 장기적·비구조적 교통 방재체계는 기존의 국토교통 방재체계의 시간적·공간적 확장을 가능케 함
  - 교통 회복탄력성 평가는 위험 상황 발생에 대비하고, 위험 상황이 발생했을 때 충격을 흡수하고 적응하며 회복하여 또 다른 위험 상황에 대비하는 순환 단계의 전 주기 평가체계를 전제하기 때문에 기존 방재체계의 시간적 대응 범위를 확장할 수 있음
  - 이 페이퍼에서 논의한 광역교통의 회복탄력성 평가는 위험 상황 발생 지점과 그 주변 피해구역뿐만 아니라 둘 이상의 지역을 연결하는 광역교통 시스템을 대상으로 하므로 기존 방재체계의 공간적 대응 범위를 확장할 수 있음
- 또한 평가 지표를 활용하여 교통 시스템의 회복탄력성을 평가하면 해당 시스템의 취약 부분을 보다 직관적으로 인지할 수 있어 세밀한 목표 전략마련을 통한 교통 시스템의 회복탄력성 강화가 가능함
  - 예를 들어 Imran et al.(2014)는 〈표 7〉과 같이 교통 시스템의 회복탄력성 강화방안을 평가 지표별로 제안함

표 7 교통 회복탄력성 평가 지표별 강화방안 예시

평가 지표	강화방안
강건성	설계 변경 및 보강을 통한 홍수·산사태 등의 자연재해에 안전한 도로와 철도 인프라 구축
예비성	대체 경로 및 교통수단 확보 및 보강
가용성	위험 상황 시 직면한 문제를 빠르게 인지하고 가용자원의 우선순위를 정하여 문제를 해결할 수 있는 조직 체계 구축
회복시간	경로(도로나 철도) 단절 시 빠르게 복구할 수 있는 역량 확보 및 강화

출처: Imran et al. 2014를 바탕으로 저자 작성.

2) 향후 연구 과제

■ 사회적 지표, 경제적 지표 등 향후 전문가 자문을 통해 다양한 관점에서 회복탄력성 평가할 수 있는 지표의 보완 필요

- 위험요인의 다양화에 대처 가능한 유연성 확보를 위해 평가 시스템 개발 단계에서 교통 회복탄력성 평가 지표의 확장이 필요함
  - 예를 들어, 교통 시스템의 보건·위생적 안전성 확보 등의 내용은 이 페이퍼에서 제시한 대비성 지표 중 '교통 피해 대응 및 저감 계획'의 정성적 평가 항목으로 포함할 수도 있지만, 상황에 따라 독립적 평가 지표로 활용할 수도 있음
- 또한 평가 지표 선정의 명확한 기준안 마련을 통해 체계적인 교통 회복탄력성 평가틀을 개발할 수 있도록 향후 전문가 자문 등을 통한 평가 지표의 선정, 가중치 결정 등을 위한 추가적인 연구가 필요함

■ 국내 대도시권을 대상으로 실제 광역교통 회복탄력성 평가 지표를 개발하고 적용하는 사례 연구를 통해 평가 시스템의 적용 가능성 시험 필요

- 해외 연구 사례와 같이 우리나라도 교통 회복탄력성 평가 지표의 연구 후, 실제 광역권을 대상으로 평가틀을 적용하고 검증하는 사례 연구를 통해 향후 국가교통 방재체계 구축과 관련 정책 수립의 근거로 활용할 필요가 있음

참고문헌

국가지표체계. 2021. 자연재해피해액. https://www.index.go.kr/unify/idx-info.do?idxCd=4289 (2021년 10월 7일 검색).

국립방재교육연구원 방재연구소. 2010. 도시방재기준 개발을 위한 요소별 분류 및 방향 설정. 서울: 방재연구소.

국토교통부. 2019. 제5차 국토종합계획(2020~2040). 세종: 국토교통부.

정동재·장수은. 2016. 교통 회복력 연구 동향과 시사점. 교통기술과 정책 13집, 5호: 56-67.

정연식·원민수·설재훈·임재경. 2012. 국가도로교통방재체계 구축방안. 경기도 고양: 한국교통연구원.

한국교통안전공단. 2021. 2020년 대중교통 현황조사(종합보고서). 세종: 국토교통부.

행정안전부. 2019. 제4차 국가안전관리기본계획(2020~2024). 세종: 행정안전부.

_________, 자연재해현황(각 연도). https://www.index.go.kr/unify/idx-info.do?idxCd=4289 (2021년 12월 12일 검색).

Adams, T. M., Bekkem, K. R., and Toledo-Durán, E. J. 2012. Freight resilience measures. J*ournal of Transportation Engineering* 138, no.11: 1403-1409.

Adey, B. T., Martani, C., Kielhauser, C., Robles Urquijo, I., Papathanasiou, N., and Marcel, B. 2019. Guideline to measure levels of service and resilience in infrastructures. (Ref. No. 769373).

Allen, W. B., Liu, D., and Singers, S. 1993. Accessibility measures of U.S. metropolitan areas. *Transportation Research Part B: Methodological* 27, no.6: 439-449.

American Psychological Association. n/d. APA dictionary of psychology. https://dictionary.apa.org/resilience (2021년 10월 7일 검색).

Baroud, H., Barker, K., Ramirez-Marquez, J. E., and Rocco S, C. M. 2014. Importance measures for inland waterway network resilience. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* no.62: 55-67.

Berdica, K. 2002. An introduction to road vulnerability: What has been done, is done and should be done. *Transport Policy* 9, no.2: 117-127.

Bešinović, N. 2020. Resilience in railway transport systems: A literature review and research agenda. *Transport Reviews* 40, no.4: 457-478.

Chan, R., Asce, S. M., Schofer, J. L., and Asce, M. 2016. Measuring transportation system resilience: Response of rail transit to weather disruptions. *Natural Hazards Review* 17, no.1,

Cox, A., Prager, F., and Rose, A. 2011. Transportation security and the role of resilience: A foundation for operational metrics. *Transport Policy* 18, no.2: 307-317.

Dalziell, E. P., and McManus, S. T. 2004. Resilience, vulnerability, and adaptive capacity: Implications for system performance. Paper presented at the Stoos, Switzerland: 1st International Forum for Engineering Decision Making (IFED),

Department for Transport. 2014. Transport resilience review: A review of the resilience of the transport network to extreme weather events.
https://www.gov.uk/government/publications/transport-resilience-review-recommendations (2021년 10월 7일 검색).

Dui, H., Zheng, X., and Wu, S. 2021. Resilience analysis of maritime transportation systems based on importance measures. Reliability Engineering and System Safety, 209.

Epstein, R. M., and Krasner, M. S. 2013. Physician resilience: What it means, why it matters, and how to promote it. *Academic Medicine* 88, no.3: 301-303.

Federal Highway Administration. 2014. Transportation system preparedness and resilience to climate change and extereme weather events. FHWA Order 5520.

Freckleton, D., Heaslip, K., Louisell, W., and Collura, J. 2012. Evaluation of resiliency of transportation networks after disasters. *Transportation Research Record* 2284, no.1: 109-116.

Garmezy, N. 1993. Children in poverty: Resilience despite risk. *Psychiatry* 56, no.1: 127-136.

Gu, Y., Fu, X., Liu, Z., Xu, X., and Chen, A. 2020. Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability, and resilience. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 133: 101809.

Holling, C. S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4, no.1: 1-23.

Hollnagel, E. 2006. *Resilience: The challenge of the unstable. In E. Hollnagel, D. D. Woods and N. Leveson* (Eds.), Resilience engineering: Concepts and precepts (pp. 9-19) Ashgate Publishing, Ltd.

Imran, M., Cheyne, C., and Harold, J. 2014. Measuring transport resilience: A Manawatu-Wanganui region case study. Resource and Environmental Planning, Palmerston North(New Zealand): Massey University.

Janic, M. 2015. Reprint of "Modelling the resilience, friability and costs of an air transport network affected by a large-scale disruptive event". *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 81: 77-92.

Jin, J. G., Tang, L. C., Sun, L., and Lee, D. 2014. Enhancing metro network resilience via localized integration with bus services. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 63: 17-30.

Leobons, C. M., Gouvea Campos, V. B., and Mello Bandeira, Renata Albergaria de. 2019. Assessing urban transportation systems resilience: A proposal of indicators. *Transportation Research Procedia* 37: 322-329.

Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority. 2015. Resiliency indicator framework. Los Angeles, CA: Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority.

Ludwig, D., Walker, B., and Holling, C. S. 1997. Sustainability, stability, and resilience. *Conservation Ecology* 1, no.1.

Luthar, S. S., Cicchetti, D., and Becker, B. 2000. The construct of resilience: A critical evaluation and guidelines for future work. *Child Development* 71, no.3: 543-562.

Mattsson, L., and Jenelius, E. 2015. Vulnerability and resilience of transport systems - A discussion of recent research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 81: 16-34.

Mudigonda, S., Ozbay, K., and Bartin, B. 2019. Evaluating the resilience and recovery of public transit system using big data: Case study from new jersey. *Journal of Transportation Safety and Security* 11, no.5: 491–519.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2017. *Improving the resilience of transit systems threatened by natural disasters, volume 1: A guide.* Washington, DC: The National Academies Press.

National Infrastructure Advisory Council. 2009. Critical infrastructure resilience final report and recommendations. https://www.cisa.gov/publication/niac-critical-infrastructure-resilience-final-report (2021년 10월 5일 검색).

Omer, M., Mostashari, A., Nilchiani, R., and Mansouri, M. 2012. A framework for assessing resiliency of maritime transportation systems. *Maritime Policy and Management* 39, no.7: 685–703.

Pan, S., Yan, H., He, J., and He, Z. 2021. Vulnerability and resilience of transportation systems: A recent literature review. *Physica A* no.581: 126235.

Tierney, K., and Bruneau, M. 2007. Conceptualizing and measuring resilience: A key to disaster loss reduction. *TR News*, 14–15, 17. https://www.trb.org/Publications/Blurbs/158982.aspx (2021년 10월 7일 검색).

UNDRR. 2020. The human cost of disasters: An overview of the last 20 years (2000–2019). https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-2000-2019 (2021년 10월 5일 검색).

Vugrin, E. D., Turnquist, M. A., and Brown, N. J. K. 2014. Optimal recovery sequencing for enhanced resilience and service restoration in transportation networks. *International Journal of Critical Infrastructures* 10, no.3-4: 218–246.

Wan, C., Yang, Z., Zhang, D., Yan, X., and Fan, S. 2018. Resilience in transportation systems: A systematic review and future directions. *Transport Reviews* 38, no.4: 479–498.

Zhou, Y., Wang, J., and Yang, H. 2019. Resilience of transportation systems: Concepts and comprehensive review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 20, no.12: 4262–4276.

국토연구원 Working Paper는 다양한 국토 현안에 대하여 시의성 있고 활용도 높은 대안을 제시할 목적으로 실험정신을 가지고 작성한 짧은 연구물입니다. 투고된 원고는 정해진 절차를 거쳐 발간되며, 외부 연구자의 투고도 가능합니다. 공유하고 싶은 새로운 이론이나 연구방법론, 국토 현안이나 정책에 대한 찬반 논의, 국내외 사례 연구나 비교연구 등 국토분야 이론이나 정책에 도움이 될 어떠한 연구도 환영합니다.
투고를 원하시는 분은 국토연구원 연구기획·평가팀(044-960-0582, jhkim@krihs.re.kr)으로 연락주십시오. 채택된 원고에 대해서는 소정의 원고료를 드립니다.

WP 21-22

광역교통의 재난 및 사고에 대한 회복탄력성(Resilience) 평가 지표 연구

연 구 진 황진욱
발 행 일 2021년 12월 27일
발 행 인 강현수
발 행 처 국토연구원
홈페이지 http://www.krihs.re.kr

KRIHS 국토연구원