
Global Report

도시 교통 네트워크 탄력성_지표, 장애 및 평가방법

1. 서론
2. 탄력성 정의 및 표현
3. 탄력성의 범위 및 지리적 위치
4. 탄력성 평가 접근방식_빅 데이터
5. 결론 및 전망

1. 서론

1.1. 개요

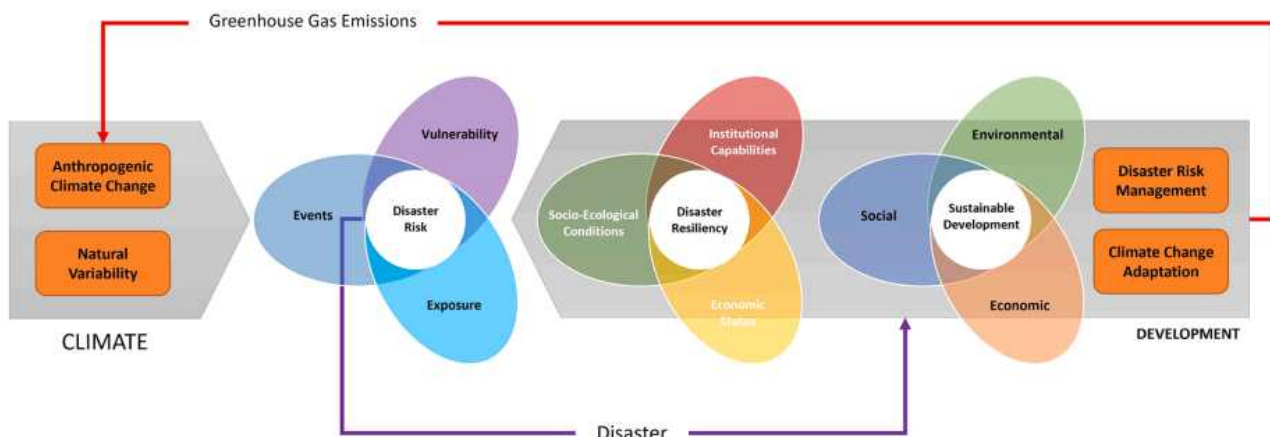
재해의 강도와 발생빈도가 지속적으로 증가하고 있다. 이 상황은 구축된 환경 및 기타 인간이 만든 시스템에 대한 현재 설계방법론의 효과에 많은 의문을 제기하고 있다[1]. 1973년 Holling이 제시한 탄력성(복원력)의 개념은 현대 과학에서 처음 도입되어 스트레스 상황에서 피해를 견디고 안정적인 상태를 회복하는 생태시스템의 능력을 의미한다. 이 개념은 후에 관리 및 엔지니어링과 같은 여러 산업분야에 도입되었으며, 탄력성 정의 및 평가방법론은 각 분야 간 다른 의미를 내포하고 있다. 이러한 정의의 대부분은 [그림 1]에 나타낸바와 같이 "위험관리, 취약성, 신뢰성, 견고성, 유연성 및 생존가능성"의 개념으로 표현되는 여러 측면을 포함하고 있다[2].



* 자료 : Mohammad Zaher Serdar et al., “Urban Transportation Networks Resilience: Indicators, Disturbances, and Assessment Methods”, Sustainable Cities and Society 76 (2022) 103452, p.2.

[그림 1] 탄력성의 구성요소들

이후 이러한 재해의 영향과 빈도의 증대는 지속가능하고 탄력적인 발전의 필요성에 대한 동기부여를 초래하였다. [그림 2]는 Nexus의 위험-탄력성 및 지속가능성을 나타낸 것이다[3].



* 자료 : Mohammad Zaher Serdar et al., “Urban Transportation Networks Resilience: Indicators,

Disturbances, and Assessment Methods”, Sustainable Cities and Society 76 (2022) 103452, p.2.

[그림 2] Nexus의 위험-탄력성 및 지속가능성

위험, 탄력성 및 지속가능성은 밀접한 상호관련이 있으며 균형을 이해하면 기후변화 및 기타 문제에 대처하기 위한 성공적인 지속가능한 전략을 개발하고 구현하는 데 도움이 될 수 있을 것이다. 이 프레임워크는 IPCC(the Intergovernmental Panel on Climate Change : 기후변화에 관한 정부 간 협의체 : UN의 세계기상기구(WMO)와 UN환경계획(UNEP)에 의해 1988년 설립된 조직으로, 인간활동에 대한 기후변화의 위험을 평가하는 것이 주 임무이다.) AR5 기후변화보고서(The Core Writing Team IPCC 2015)에 보고된 위험 프레임워크를 기반으로 개발되었다.

1.2. 도시 탄력성을 위한 운송 네트워크의 중요성

도시화가 가속화되고 도시인프라의 복잡성과 상호의존도가 증가하면서 새로운 위험요인들이 발생하고 그 영향을 증폭시키고 있다. 최근 수십 년 동안 도시화 가속화 추세는 전 세계적으로 확산되었다. 전 세계 인구의 약 절반이 도시지역에 살고 있다. 이 도시거주자는 2050년까지 전 세계 인구의 3분의 2로 증가할 것으로 예상된다[4]. 이러한 경향은 도시를 실질적인 경제, 사회 및 인구 통계학적 허브로 변화시켰다. 따라서 이러한 도시 중심부에서 중요한 서비스(전기, 물, 운송, 건강 및 통신망 등)의 손상이나 손실은 사회적, 환경적, 경제적 비용 측면에서 중대한 결과를 초래할 수 있다. 교통(운송) 네트워크는 SDGs(Sustainable Development Goals : 지속가능한 개발목표)를 달성하는 데 중요한 역할을 하며, 이러한 탄력성은 사회적 영역에서도 이러한 목표를 달성하는 데 도움이 될 수 있다. 도시 교통 네트워크는 경제, 환경 및 사회를 포함한 모든 지속가능한 개발에 영향을 미친다. 이는 2021년 UN에서 개발한 SDGs 3,9,11(SuM4All 2017, UNITED NATIONS 2021)에 반영된다. 도시교통의 개발은 다른 모드 산업 분야와의 적절한 조합과 잘 설계된 네트워크를 통해 경제성장의 허브로 작용할 수 있다. 교통체증으로 인해 도로에서 낭비되는 시간과 도시거주자의 출퇴근 시 교통비용을 줄일 수 있다.

추가적으로 도시교통 특히 GHG(Green House Gas : 온실가스) 배출로 인한 엄청난 사회적 비용을 줄이는 데 크게 기여할 수 있다. 예를 들어, 미국에서는 대부분의 온실가스 배출량이 운송 부문에서 배출되고 있다. 그러나 도시 교통모드 통합 및 전기자동차의 채택률이 증가하면 GHG 배출량을 크게 줄일 수 있다. 끝으로 지속가능하고 탄력적인 도시교통 네트워크의 개발은 지역사회를 발전시키고 불평등을 줄이는 데 필수적인 역할을 한다.

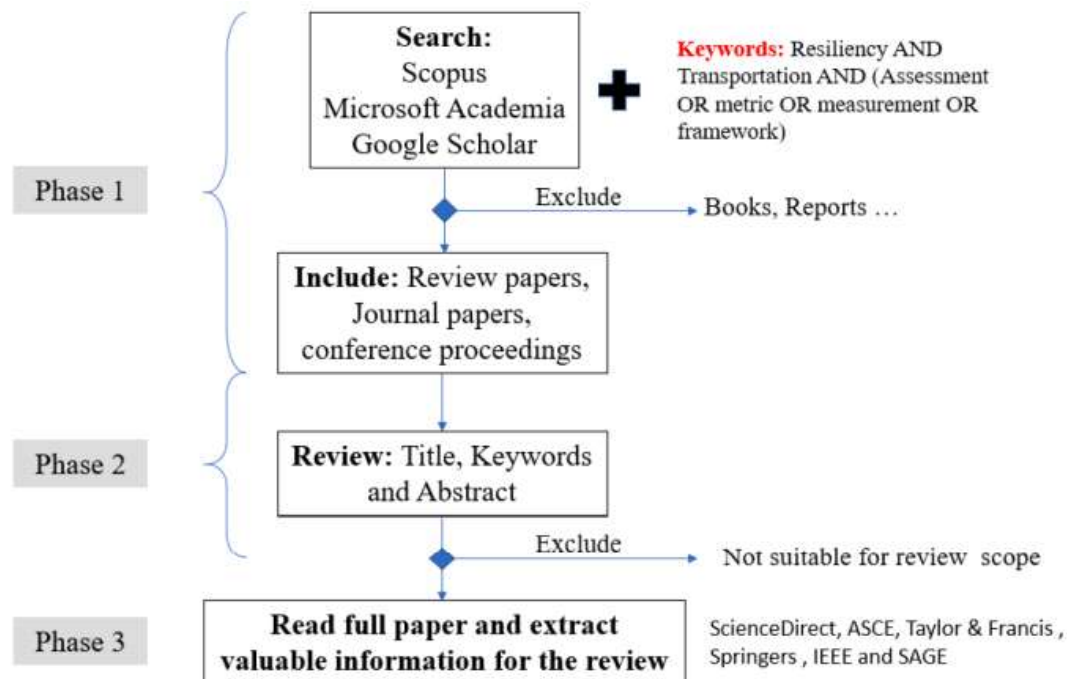
2. 탄력성 정의 및 표현

탄력성에 대해 보편적으로 인정된 정의(definition)가 없다는 사실은 어떤 개량치를 측정해야 하는지가 불분명하여 다양한 접근방식을 비교할 수 있는 능력을 제한하고 있다. 탄력성 문제에 접근하기 위해서는 평가도구를 형성하고 그 효과와 적용성을 결정하는 데 중요한 역할을 하는 다양한 개념과 정의를 사용해야 한다[5]. 그러나 대부분의 연구자들은 탄력성 연구의 두 가지 측면(충격감소 및 신속한 복구)에 초점을 맞추고 있다. 탄력성 정의와 그 변화에 대한 추가적인 논의는 2015년 Faturechi 등, 2016년 Hosseini 등에 의해 수행된바 있다. 제안된 표현은 단순화되고 측정가능하며, 잘 조사된 구성요소의 혼합을 통해 탄력성을 정량화하는 새로운 방법의 토대를 제시하고 있다. 제안된 방식은 탄력성을 더 간단한 특성으로 나누고 이를 예상성과 연결하여 탄력성을 더 잘 평가하고 결과 위험을 더 잘 관리할 수 있도록 한다. 이러한 특성은 밀접하게 관련되어 시스템의 전반적인 탄력성에 기여하고 있다. 이러한 표현은 다음과 같이 시스템 성능 및 복원력에 대한 각 특성의 주요 기여를 강조한다:

- 1) 신뢰성은 초과 용량으로 표현 될 수 있다.

- 2) 취약점은 오류발생에 대한 네트워크의 저항에 의해 표현될 수 있다.
- 3) 생존력은 잔류 용량으로 표현할 수 있다.
- 4) 네트워크 복구속도에 의해 견고성을 표현할 수 있다.
- 5) 유연성은 개선가능성(Improvability)에 의해 표현 할 수 있다.

이러한 방법은 구성요소에 대한 탄력성을 분석하기 위해 다양한 교통 장애에 대한 인프라 대응을 관리하고 재해 전 및 사후 여러 단계에서 리소스를 할당하여 복원력 사각지대의 무차별적 감소가 아닌 각 특성과 관련된 특정목표 및 전제조건으로 성능을 조정하는 데 도움이 될 수 있다. 또한 이러한 특성의 시스템 복원력 기여도는 성능 시간차트에 투영되어 이러한 기여를 정량화하여 [그림 3]과 같이 탄력성이 미치지 않는 사각지대를 계산한다.



* 자료 : Mohammad Zaher Serdar et al., “Urban Transportation Networks Resilience: Indicators, Disturbances, and Assessment Methods”, Sustainable Cities and Society 76 (2022) 103452, p.4.

[그림 3] 연구방법론

탄력성이 미치지 않는 사각지대의 계산은 2003년 Bruneau 등이 제시한 (식 1)과 같이 계산할 수 있다:

$$R = \int_{t_0}^{t_2} [100 - Q(t)] dt \quad \dots\dots\dots (\text{식 1})$$

여기서 R은 복원력(탄력성) 지수, t_0 은 재해가 시작된 시간, t_2 는 재해가 끝난 시간, Q(t)는 현재 시스템의 성능(t)을 나타낸다.

3. 탄력성의 범위 및 지리적 위치

3.1. 자연재해

자연재해는 도시의 지역적, 지리적 특성과 관련이 있으며 역사적으로 반복되는 현상에서 기후변화로 인한 새로운 위협에 이르기까지 매우 다양하게 나타나고 있다. 화산폭발과 지진과 같은 거대한 자연재해가 재발하여 도시지역에 엄청난 피해와 경제적 손실을 초래하고 있다. 반복되는 재해의 정도는 상당하며 예고 없이 발생할 수 있다. 이러한 사건에 대한 역사적 경험은 그 영향을 제한하기 위해 보호적인 관행과 규정의 개발로 이어졌다. 예를 들면, 이러한 재해에 대응하여 구축코드와 표준이 개발되었다. 기후변화는 강수패턴의 변화와 빙하가 녹는 등 많은 영향을 미치고 있다. 이러한 영향으로 인해 많은 기존의 취약점이 노출되고, 해수면상승 및 홍수와 같은 특정 도시지역에 전혀 없는 새로운 취약점으로 나타나고 있다. 특히 코로나-19 전염병이 전 세계를 강타하는 동안 대중교통에 관한 운영조치는 바이러스의 확산 및 운영비용을 낮추는 것을 목표로 여러 국가에서 시행되고 있다. 그러나 이러한 조치는 전염병의 단계와 정책입안자의 결정에 따라 끊임없이 변화하고 있다. 코로나-19 전염병이 전 세계를 강타하는 동안 주요국/주요도시에서의 대중교통을 위해 취한 운영조치사례를 <표 1>에 나타낸다.

<표 1> Covid-19 동안 대중교통을 위해 취한 운영조치사례

측정	사례
총 잠금 장치	- 중국(Wuhan)(2020년 Jiang 등) - 인도(전국)(2020년 Gettleman & Schultz)
업무량 감소(시간 및 지역)	- 영국(런던) - 미국(워싱턴) (2020년 Gkiotsalitis & Cats)
운영에 변화 없음	- 중국(홍콩) (2020년 Gkiotsalitis & Cats)

* 자료 : Mohammad Zaher Serdar et al., “Urban Transportation Networks Resilience: Indicators, Disturbances, and Assessment Methods”, Sustainable Cities and Society 76 (2022) 103452, p.7.

3.2. 교통사고

교통사고는 각각 특성이 있으며, 모든 인프라 또는 네트워크에서 발생할 수 있기 때문에 운송 네트워크의 상태는 관련 영향을 줄이는 데 중요한 역할을 한다. 특히 전 세계 전체 자동차의 60% 정도만을 보유하고 있는 중/저소득 국가에서 93%의 자동차사고 치명율을 나타내는 것은 이러한 불균형적인 쏠림현상을 명확히 보여준다.[6]. 교통사고로 인해 대부분 국가의 사회적 손실은 국내총생산의 약 3%를 차지하는 것으로 추산된다. 교량이나 터널과 같은 중요한 링크에 영향을 미치는 여러 가지 무작위 사고 또는 단일 사고가 탄력 있는 네트워크를 위협해서는 안 된다. 평가는 현지 교통부서의 사용가능한 사고데이터를 기반으로 현재 네트워크와 계획을 평가해야 한다. 추가적으로 도시계획자는 병목현상을 일으키지 않도록 대안을 제시해야 한다. 특히 사고의 영향은 중요도가 낮은 도로에서도 영향을 미치는 도로가 중요할 경우 또는 몇 건의 연쇄적 사고를 유발 할 경우 주요 한 영향을 미칠 수 있기 때문에 다양하게 변하게 된다.

4. 탄력성 평가 접근방식_빅 데이터

운송 네트워크의 빅 데이터 응용프로그램은 탄력성(복원력)을 평가하는 효율적인 방법을 제공할 수 있다. 최근 몇 년 동안 프로브 카(probe cars)와 같은 센서와 데이터 저장 및 처리의 발전으로 인해 원시데이터의 처리가 가능해졌다. 매우 다양한 분야에서 대규모 레코드 데이터베이스가 개발되었다. 이러한 데이터는 매우 유용한 정보소스를 제공하고 높은 가치를 보유하고 있다. 모든 데이터는 처리 및 필터링을 통해 가장 관심이 많은 주제를 파라미터로 추출하며, 추출방법에 따라 결과가 달라질 수도 있다. 빅

데이터 분석방법은 운송 네트워크의 상황과 동적 변화를 나타내기 위해 리소스 소비가 가장 낮은 데이터의 압도적 흐름을 처리하기 위한 효율적인 접근방식을 도입하는 것을 목표로 하고 있다. 이 방법에서는 데이터 원본, 가용성 및 필터링 프로세스 결과, 리소스 요구 및 향후 성능예측 등 일부 제한요인이 있을 수 있다. 따라서 이 방법은 지형/용량/실제 물리적 손상과 같은 네트워크 속성을 잘못 표현하여 문제가 되는 경우가 있다. 빅 데이터 분류를 기반으로 한 여러 가지 연구의 요약은 <표 2>에 나타낸다.

<표 2> 빅 데이터 분류를 기반으로 한 여러 연구의 요약

연구	빅 데이터 분류		
	형태	연구소스	응용분야
- Ilbeigi, 2019 - Donovan & Work, 2017	구조화된	택시의 GPS기록	도시 도로망
- Chandramouleeswaran & Tran, 2018	구조화된	공항의 트래픽 기록	항공 운송망
- Diab & Shalaby, 2019	구조화된	전철 운행기록	전철망
- Chan & Schofer, 2016	반 구조화된	전철의 총 로그	전철망
- Roy 등, 2019	비 구조화된	트위터의 지리적 위치 태그	재해 감지 및 인적 이동성패턴

* 자료 : Mohammad Zaher Serdar et al., “Urban Transportation Networks Resilience: Indicators, Disturbances, and Assessment Methods”, Sustainable Cities and Society 76 (2022) 103452, p.9.

5. 결론 및 전망

교통 네트워크는 전 세계 도시 기능의 초석이다. 특히 급속한 도시화와 기후변화와 같은 스트레스가 증가하는 상황에서 주민의 번영과 삶의 질을 보장하는 데 중요한 역할을 한다. 도시화와 기후변화는 전례 없는 재해의 심각성과 관련이 있다. 이러한 변화하는 상황에 직면하기 위해 탄력성(복원력)을 구축할 필요가 있다. 이를 효과적으로 구축하기 위해서는 정확한 측정(예측) 기능이 필수적으로 요구된다. 그간 운송 네트워크의 탄력성을 평가하기 위한 다양한 정의, 지표 및 방법들이 제안되었다. 이러한 변화는 교통장벽(장애)의 특성, 규모 및 영향의 차이 때문으로 나타날 수 있음을 확인하였다.

최근 몇 년 동안 자연재해, Covid-19 전염병과 같은 파괴적인 사건발생 빈도와 강도가 급증함에 따라 도시 교통 네트워크의 탄력성(복원력)이 주목받고 있다. 이 연구에서는 기후변화, 전염병, 사이버보안 등과 같은 기술과 패러다임이 도시 교통 네트워크의 탄력성에 미치는 영향을 조사하였다. 이 연구결과는 국내 자연재해 및 Covid-19 등으로 인한 도시 교통 네트워크의 탄력성 있는 정책에 벤치마킹 자료로 활용할 수 있을 것이다.

[참고문헌]

- [1] Addanki, SC, & Venkataraman, H. (2017). Greening the economy: A review of urban sustainability measures for developing new cities. Sustain Cities Soc, 32, 1-8.
<<https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.03.009>>
- [2] Faturechi, R, & Miller-Hooks, E. (2015). Measuring the Performance of Transportation Infrastructure Systems in Disasters: A Comprehensive Review. J Infrastruct Syst, 21, Article 04014025.
<[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000212](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000212)>
- [3] UN Dept. of Economic and Social Affairs. The infrastructure—inequality—resilience Nexus.

New York: 2016.

- [4] Addanki, SC, & Venkataraman, H. (2017). Greening the economy: A review of urban sustainability measures for developing new cities. *Sustain Cities Soc*, 32, 1–8.

<<https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.03.009>>

- [5] Wan, C, Yang, Z, Zhang, D, Yan, X, & Fan, S. (2018). Resilience in transportation systems: a systematic review and future directions. *Transp Rev*, 38, 479–498.

<<https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1383532>>

- [6] World Health Organization. Global status report on road safety 2018. Geneva, Switzerland: 2018.

<원문제목> Urban Transportation Networks Resilience: Indicators, Disturbances, and Assessment Methods

<원문출처> Sustainable Cities and Society 76 (2022) 103452