

교통 회복력 연구 동향과 시사점

Review on Transport Resilience



정동재



장수은

서론

교통 시설은 사람과 재화의 신속, 안전, 편리한 이동을 위해 필요한 사회기반시설이다. 매일 많은 사람과 재화가 이 기반 시설을 이용해 이동한다. 따라서 교통 서비스의 성능(performance)은 사회(의료, 교육, 문화 등), 경제(물류, 통근, 업무 등) 활동에 직·간접적인 영향을 미친다. 정부와 지자체가 교통 서비스를 제공, 관리하기 위하여 매년 상당한 예산을 투자¹⁾하는 것도 교통 서비스의 중요성을 간접적으로 시사한다.

교통 서비스의 성능을 특정 수준으로 유지하는 것은 어려운 일이다. 교통 서비스의 성능은 자연적(홍수, 지진 등), 기술적(정전, 고장, 유가급등 등), 인적(화물연대, 철도노조 파업 등) 요인에 의

한 돌발상황에 영향을 받지만, 이러한 잠재적 요인을 모두 제거하는 것은 사실상 불가능하기 때문이다. 오히려 영국의 교통부는 기후변화로 인해 기상 이변 횟수가 잦아질 것이라는 과학계의 예측을 고려하여, 교통 부문에서 돌발상황에 의한 성능 저하가 발생할 확률이 높아질 것으로 예측하였다(UK DfT, 2014). 이에 따라 위험(risk)에 효과적으로 대응하며 그 영향을 최소화 하고, 돌발상황을 극복하는 방법의 중요성이 강조되었고, 이러한 과정을 아우르는 교통 회복력(Transport Resilience) 개념과 전략(US DoT, 2009; UK DfT, 2014)에 관련된 연구들이 진행되고 있다.

이 글에서는 교통 회복력에 대한 학술 및 정책 동향을 살펴보고 시사점을 도출하고자 한다. 먼저 II장에서 회복력의 정의, 속성, 정량화 방식에 대

정동재 : 서울대학교 환경계획학과 교통학전공, jdj0418@snu.ac.kr, Phone: 02-880-5646, Fax: 02-885-2096

장수은 : 서울대학교 환경계획학과 교통학전공, jsc@snu.ac.kr, Phone: 02-880-1444, Fax: 02-871-8847

1) 국토교통부의 「2014회계연도 예산 개요」에 따르면 도로부문 정부 예산은 2013년 기준 8조 9,344억원에 달한다.

한 학술 동향을 정리하고, III장에서 회복력을 높이기 위한 정책적 전략과 시사점을 살펴본다. 이어서 IV장은 이 글을 요약한다.

학술 동향

1. 회복력의 정의

회복력은 표 1과 같이 다양하게 정의된다. 그 중 대표적인 정의는 두 가지이다. 첫째, 시스템이 한 상태에서 다른 상태로 변화되지 않은 채 흡수할 수 있는 충격²⁾의 크기, 또는 충격을 흡수하는 능력으로 정의된다. 둘째, 충격을 받은 후 회복(Recovery)³⁾하는 속도, 또는 빠르게 회복하는 능력으로 정의된다 (Adger, 2000; Reggiani, 2013). Rose (2007)은 위 두 정의를 각각 정적 회복력(Static resilience)과 동적 회복력(Dynamic resilience)으로 구분하였다. 이 두 정의에 의하면 시스템이 충격을 흡수하여 안정된 상태로 기능을 유지하거나 또는 충격을 받은 후 회복하는 속도가 빠르면 '회복력이 높다(resilient)'고 말할 수 있다.

회복력의 정의에서 중요한 키워드는 흡수(Absorption)와 회복(Recovery)이다. 기존 정의들은 충격을 견디고('withstand', 'mitigate', 'minimizing', 'resisting' 등) 기능을 유지('operating', 'functioning', 'managing', 'survive', 'without breaking', 'persistence', 'remain', 'continue', 'maintain', 'retain' 등)하는 능력을 다양하게 표현하지만, 이는 흡수 능력으로 함축할 수 있다. 또한 충격에 효과적으로 반응('respond', 'flexibility', 'facilitate', 'implement')하여 충격 이전의 상태로 되돌아가는 능력('return', 'restoring')과 예전과 비교해 동등 수준 이상의 기능을 발휘하는 새로운 상태로 적응 및 개선('remedy', 'reorganize', 'develops', 'adaptation', 'adjust',

'improve', 'feedbacks')하는 능력은 회복 능력에 포함된다(표 1 참조). 흡수와 회복은 닭과 달걀과 같은 관계로, 회복 활동은 시스템의 흡수 능력을 높이고, 흡수 능력의 향상은 충격 이후 필요한 회복 활동량을 줄인다. 이상의 내용을 요약하면, 회복력은 시스템의 기능이 유지되도록 충격을 흡수하는 능력과 충격에 효과적으로 반응하여 이전 상태 이상의 성능을 발휘하는 상태로 빠르게 회복하는 능력이다.

2. 회복력의 속성

실질적인 회복 활동은 충격이 시스템에 영향을 미친 이후에 시작된다. 하지만 회복력을 높이기 위한 계획, 교육, 훈련, 기술도입 등의 활동은 충격이 발생되기 이전부터 이후까지 계속 필요하다(US DoT, 2009). 이처럼 회복력은 하나의 결과물이 아니라, 충격 발생 이전에 시스템의 흡수 및 회복 능력을 강화하는 것에서 충격 발생 이후에 이를 발휘하기까지 일련의 과정이다(Norris et al., 2008; US DoT, 2009; Rose, 2009; Martin and Sunley, 2014). 이러한 회복력의 특성을 이해하고 효과적인 회복력 향상 전략을 수립하기 위하여 흡수 및 회복 과정을 여러 단계로 구분하는 노력도 있었다. 예컨대 US DoT (2009)는 재난에 대한 교통시스템의 흡수 및 회복 과정을 준비단계(preparedness phase), 충격(disaster), 대응단계(response phase), 회복단계(recovery phase)로 구분하고 충격 발생 전, 후 각각에 대한 회복력 향상 전략을 제시하였다. 또한 각 단계는 그림 1과 같이 순환하는 것으로 표현하였다.

Maruyama et al. (2014)는 흡수 및 회복 과정을 보다 세분하여 운영 및 대비단계, 조기경보단계, 충격, 긴급대응단계, 회복 및 합의단계, 혁신단계, 새로운 시스템 설계단계 등 8단계로 구분하였다.

2) 연구의 대상에 따라 shock (Maruyama, 2014), disaster, incident (US DoT, 2009), disturbance (Martin and Sunley, 2014), stressor (Norris et al., 2008) 등으로 달리 표현되지만 이 글에서는 '충격'으로 통일하여 사용한다.

3) Recovery는 국내 관련 문헌들에서 복구, 복원, 재생, 회복 등 다양하게 번역되고 있으나, 회복이 가장 근접한 표현인 것으로 판단된다. 이 글에서는 recovery를 일관되게 회복으로 지칭하며, 회복력(resilience)과 구분한다.

표 1. 회복력의 정의

연구명	정의	분류	
		흡수	회복
Holling (1973)	The persistence of relationships within a system; a measure of the ability of systems to absorb changes of state variables ...	✓	
Gordon (1978)	The ability to ... deflect elastically under a load without breaking or being deformed	✓	
Holling et al. (1995)	The buffer capacity or the ability of a system to absorb perturbation, or the magnitude of disturbance that can be absorbed ...	✓	
Levins et al. (1998)	The ability to experience change and disturbances without catastrophic qualitative change in the basic functional organisation	✓	
Miletti (1999)	... to withstand an extreme natural event without suffering devastating losses ...	✓	
Adger (2000)	The ability of communities to withstand external shocks ...	✓	
Godschalk (2003)	During disaster, both must be able to survive and function under extreme stress	✓	
Longstaff (2005)	The ability ... to continue its existence in the face of some sort of surprise ...	✓	
Rose (2007)	The ability ... to maintain function when shocked	✓	
Masten et al. (1990)	The process of, capacity for, or outcome of successful adaptation ...		✓
Wildavsky (1991)	The capacity to cope with unanticipated dangers ...		✓
Egeland et al. (1993)	The capacity for successful adaptation, positive functioning, or competence ...		✓
Brown and Kulig (1996)	The ability to recover from or adjust easily to misfortune or sustained life stress		✓
Horne and Orr (1998)	A fundamental quality ... to respond productively to significant change ...		✓
Comfort (1999)	The capacity to adapt existing resources and skills to new systems ...		✓
Paton et al. (2000)	An active process of self-righting, learned resourcefulness and growth ...		✓
Paton and Jonston (2001)	A capacity of people and systems that facilitate organizational performance to maintain functional relationships ...		✓
Waller (2001)	Positive adaptation in response to adversity		✓
Ganor and Ben-Lavy (2003)	The measure of adaptation and flexibility		✓
Pelling (2003)	The ability ... to cope with or adapt to hazard stress		✓
Coles and Buckle (2004)	A community' s capacities, skills, and knowledge that allow it to participate fully in recovery from disasters		✓
Pfefferbaum et al. (2005)	The ability ... to take meaningful, deliberate, collective action to remedy the impact of a problem ...		✓
UNISDR (2005)	The capacity ... to adapt, by resisting or changing in order to reach and maintain an acceptable level of functioning and structure.		✓
Butler et al. (2007)	Good adaptation under extenuating circumstances		✓
Norris et al. (2008)	A process linking a set of adaptive capacities to a positive trajectory of functioning and adaptation after a disturbance		✓
Mallak (1998)	The ability ... to expeditiously design and implement positive adaptive behaviours ..., while enduring minimal stress	✓	✓
Bruneau et al. (2003)	The ability ... to mitigate hazards, contain the effects of disasters when they occur, and carry out recovery activities ...	✓	✓
Cardona (2003)	The capacity ... to absorb negative impacts and recover from these.	✓	✓
Klein and Nicholls (2003)	(i) the amount of disturbance a system can absorb and still remain within the same state ... and (ii) the degree to which the system is capable of self-organization	✓	✓
Rose (2009)	The process by which a community develops and efficiently implements its capacity to absorb an initial shock through mitigation and to respond and adapt afterward so as to maintain function and hasten recovery, as well as to be in a better position to reduce losses from future disasters	✓	✓
UK DfT (2014)	The ability ... to withstand the impacts of extreme weather, to operate in the face of such weather and to recover promptly from its effects	✓	✓



그림 1. Emergency Management Cycle (US DoT, 2009)

회복력은 흡수 및 회복의 각 단계에서 다양한 속성들과 상호 연관을 가지며 발현된다. Martin and Sunley (2014)은 회복력의 다섯 가지 필수적인 속성으로 충격의 특성(규모, 유형, 지속시간 등), 충격에 대한 시스템의 민감도를 의미하는 취약성(Vulnerability), 충격이 시스템에 미치는 초기 영향력을 결정하는 저항성(Resistance), 충격에 대응해 적응 및 조정하는 강건성(Robustness), 충격의 영향을 회복하는 정도와 회복 방향의 적합성을 의미하는 회복성(Recoverability)을 꼽았다. 또한 회복력의 속성을 그림 2와 같이 반복

적 과정(recursive process) 즉, 충격과 회복성이 시스템의 구조, 기술력, 생산성 등 회복력의 결정요인에 변화를 가져오고, 이는 다시 향후 충격에 대한 시스템의 취약성, 저항성, 강건성에 영향을 미치는 것으로 표현하였다.

한편 Norris et al.(2008)은 그림 3과 같이 회복력의 속성을 저항성, 회복성으로 구분⁴⁾하고, 저항성과 회복성은 충격의 심각도(Severity), 지속성(Duration), 의외성(Surprise)과 자원의 강건성, 예비성(Redundancy), 신속성(Rapidity)에 따라 결정되는 것으로 표현하였다. 즉, 충격의 심각도, 지속성, 의외성이 높으면 저항성과 회복성은 낮아지고, 자원의 강건성, 예비성, 신속성이 높으면 저항성과 회복성도 높아진다. 충격을 받은 시스템은 저항성의 크기에 따라 기능장애 발생 여부가 결정되고, 회복성의 크기에 따라 기능장애가 영구적일지 또는 회복하여 새로운 상태로 적응 및 개선되는지가 결정된다. 그밖에 Bruneau et al.(2003)은 강건성, 예비성, 변통성(Resourcefulness)을, Cox et al.(2011)은 취약성, 변통성,

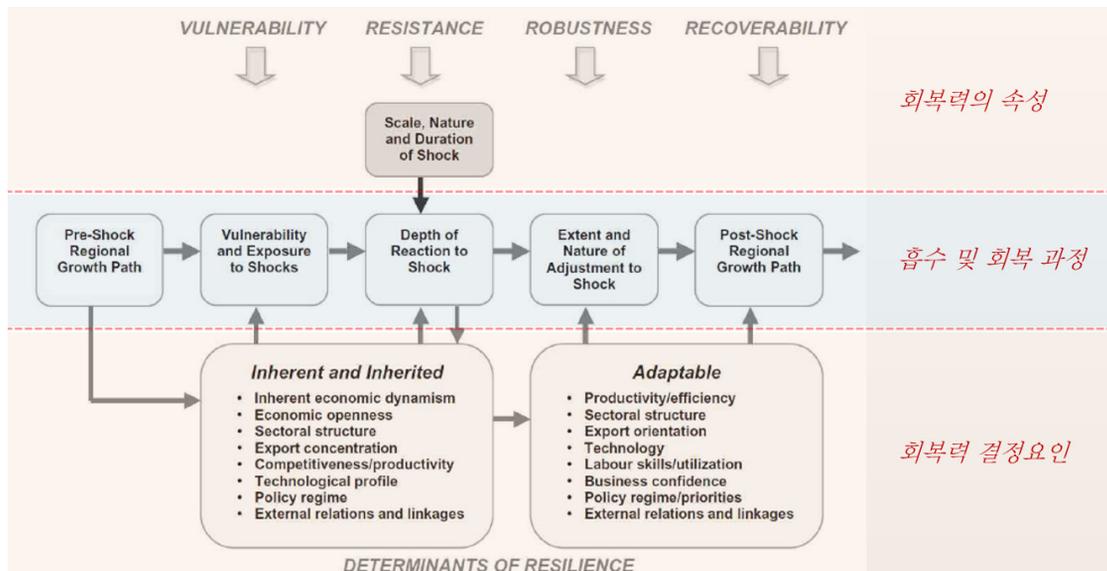


그림 2. Elements of resilience as a process 1 (Martin and Sunley, 2014)

4) Norris et al.(2008)은 그림 3에서 회복력(Resilience)으로 표시하였으나 해당 연구 및 관련 연구를 종합하면 회복력은 흡수와 회복 과정을 포괄하는 개념에 가까우므로 회복성(Recoverability)으로 표현하는 것이 적합해 보인다. 또한 그림 3에서 취약성도 제시되지만 이 연구에서 취약성은 회복성의 상반된 개념으로 쓰이므로 제외하였다.

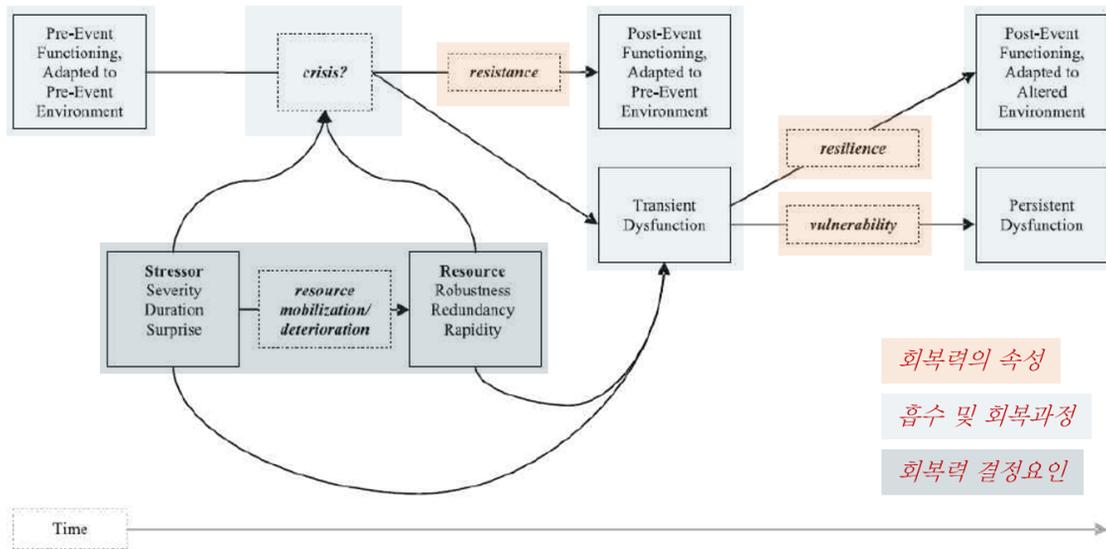


그림 3. Elements of resilience as a process 2 (Norris et al., 2008)

유연성(Flexibility)을 회복력의 속성으로 고려하였다.

이처럼 일련의 흡수 및 회복 과정을 단계별로 구분하고, 각 단계에서 발현되는 회복력의 속성과 그 특성을 이해하는 것은 회복력의 개념을 구체화하는데 효과적이다. 또한 회복력 향상 전략을 수립하는데 도움이 될 것이다. 다만, 흡수 및 회복 과정의 구분 방식과 회복력의 대표 속성에 대해서는 추가 논의가 필요해 보인다. 특히 강건성, 예비성, 변통성, 취약성, 유연성, 신속성, 반응성, 저항성, 회복성 등 회복력의 다양한 속성들의 정의, 구분(또는 위계), 특성 등을 포괄적으로 검토하는 연구가 이루어져야 한다.

3. 회복력의 정량화

Rose (2007)은 충격으로 시스템이 겪는 변화를 경제적 관점에서 비교함으로써 회복력을 정량화하는 방법론을 제안하였다. 여기서 회복력은 측정하는 시간적 범위에 따라 정적 회복력(static resilience)과 동적 회복력(dynamic resilience)으로, 경제적 파급효과에 따라 직접 회복력(direct resilience)과 총 회복력(total resilience)으로

구분할 수 있다. 정적 회복력은 특정 시점의 회복력을, 동적 회복력은 주어진 시간 범위 동안의 회복력을 각각 의미한다. 한편, 직접 회복력은 충격이 특정 시스템에 미치는 직접 효과만을 고려하지만, 총 회복력은 직접 효과뿐만 아니라 해당 시스템과 연관을 맺고 있는 다른 시스템과의 상호작용(간접효과)도 평가한다. 즉, 직접 회복력은 미시적 수준의 부분균형(partial equilibrium) 분석으로, 총 회복력은 거시적 관점의 일반균형(general equilibrium) 접근으로 정량화한다.

그림 4는 Rose (2007)의 정량화 방법론을 교통체계적으로 해석한 개념도이다. 그림에서 수평축은 시간(T)을, 수직축은 교통체계의 성능(performance; 미시적 관점) 또는 교통체계를 바탕으로 한 사회, 경제활동 수준(거시적 관점)(P)을 의미한다. 개념도에는 서로 다른 교통체계($i=1,2$)의 성능 함수 $P_i(\cdot)$ 가 도시되어 있다. 여기서 교통체계의 성능이란 교통량, 속도 등의 지표를 예로 들 수 있다. 서로 다른 교통체계란 동일한 지리적 범위에서 질적으로 상이한 교통체계를 의미하거나, 또는 동일 시점에서 서로 다른 공간적 범위를 대상으로 한 교통체계가 고려될 수 있다. 이를테면 전자는 고속철도 개통 전, 후의 지역간 교통체계

회복력의 속성
흡수 및 회복과정
회복력 결정요인

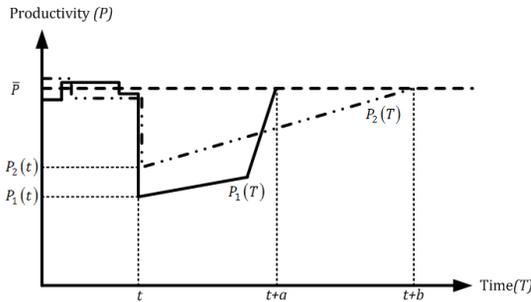


그림 4. Conceptual diagram for the quantification of resilience

를, 후자는 유가 급등과 같은 충격에 달리 반응하는 도시부와 지방부의 교통체계를 예로 들 수 있다. 따라서 연구 목적에 따라 하나 또는 셋 이상의 교통체계도 고려될 수 있다.

그림 4에서 충격 이전($T < t$) 교통체계의 성능은 미세하게 변화하나 전반적으로 안정적(steady-state)이다. 그런데 시점 t 에서 교통체계에 충격이 발생하였다. 그 결과 교통체계의 성능이 하락한다. 이때 직접 정적 회복력(DSR, direct static resilience)은 충격 이후 발생한 교통체계의 성능 변화로 측정할 수 있는데, 예컨대, 교통체계 1의 DSR은 식(1)과 같다.

$$DSR_1(t) = \bar{P} - P_1(t) \quad (1)$$

여기서 \bar{P} 와 $P_1(t)$ 는 각각 충격 이전 교통체계의 평균적 성능과 충격 이후 시점 t 에서 교통체계 1의 성능이다. DSR이 작을수록 교통체계의 정적 회복력 수준이 높다고 해석할 수 있다. 식(1)을 어느 시점 T 에 대한 교통체계 i 의 DSR로 일반화하면 식(2)와 같다.

$$DSR_i(T) = \bar{P} - P_i(T) \quad (2)$$

총 정적 회복력(TSR, total static resilience)은 식(3)과 같이 DSR로 간접적으로 평가할 수 있다.

$$\alpha \times DSR_i(T) \quad (3)$$

여기서 α 는 범경제(economy-wide) 승수로서, 산업연관분석(input-output analyses)이나 연산일반균형모형(computable general equilibrium models) 등을 통해 추정할 수 있다.

시점 t 에서 $DSR_2(t)$ 이 $DSR_1(t)$ 보다 더 작으므로 교통체계 2가 교통체계 1에 비해서 회복력이 높다고 평가할 수 있다. 그러나 교통체계 1은 시점 $t+a$ 에 충격 이전의 성능 \bar{P} 로 회복된 반면, 교통체계 2는 시점 $t+b$ 에 \bar{P} 로 회복되었다. 이 경우 어떤 시스템의 회복력이 더 높은지를 평가해야 하는데, 이는 식(4)와 같이 직접 동적 회복력(DDR, direct dynamic resilience)의 측정으로 가능하다.

$$DDR_i[t, t + \Delta t] = \int_t^{t + \Delta t} (P_i(T) - P_i(t)) dT \quad (4)$$

DDR은 시점 t 와 $t + \Delta t$ 사이에 회복된 교통체계의 성능을 의미하므로, 값이 클수록 더 큰 회복력을 의미한다. 총 동적 회복력(TDR, total dynamic resilience)도 DDR에 승수 α 를 곱하여 산정할 수 있다.

지금까지 살펴본 회복력의 정량화 방식은 교통체계의 회복력과 성능(또는 교통체계를 바탕으로 한 사회, 경제활동 수준)에 대한 통찰력을 제공한다. 다만, 실제 회복력의 정량화를 위해서는 충격의 특성(종류, 지속기간 등)별 교통체계에 미치는 영향력과 충격 이후 교통체계의 성능(또는 교통체계를 바탕으로 한 사회, 경제활동 수준)을 추정하는 구체적인 방법에 대해 추가 논의가 필요하다. 또한, 취약성, 저항성, 강건성, 예비성 등 회복력의 속성을 개별적으로 정량화하기 위한 관련 지표 개발이 선행되어야 한다. 취약성은 예컨대, 특정 도로의 폐쇄로 인한 도로망 전체 이용자의 통행시간 변화 또는 교통망 상태 변화에 따른 접근성의 민감도 등의 지표로 측정되기도 하나(Jenelius et

al., 2006; Jenelius, 2009; 이상조, 2015 등), 이외 속성의 평가 지표에 대한 논의는 부족하다. 저항성은 교통사고 발생확률, 강건성은 교통망 결절점에 연결된 평균 링크수, 예비성은 대안 교통수단 및 경로의 가치, 변통성은 교통정보 제공 수준 및 영향, 회복성은 복구 이후 교통비용 수준 등의 지표를 고려할 수 있다.

정책 동향

회복력에 대한 학술적 연구 성과와 실제 경험을 토대로 회복력 향상 전략을 수립하는 것은 위험에 효과적으로 대응하고 피해를 최소화 하는데 중요한 역할을 한다. 실제로 미국과 영국의 교통부는 각각 회복력 제고 전략을 개발하여 위기 대응 및 회복 과정에서 역할과 목표를 설정하고 있다.

먼저 미국 교통부(Department of Transportation: DoT)의 국가교통 회복전략(National Transportation Recovery Strategy; NTRS)은 교통산업 이해관계자와 정부가 위기에 효과적으로 대비, 대응, 회복하는 전략을 제시한다(DoT, 2009). 여기서 위기는 자연적, 기술적, 인적 원인의 재난을 모두 포함한다. NTRS의 특징은 재난 발생 이전에 준비해야 할 전략과 재난 발생 이후에 운영해야 할 전략을 수행 주체별(교통산업 이해관계자, 행정체계별 정부)로 구분하여 제시함으로써 단계별 목표와 역할을 구체화하는 점이다. NTRS는 충격 이후 특정 교통수단의 성능이 다른 교통 수단의 성능에 직·간접적으로 영향을 미칠 수 있으며, 나아가 커뮤니티의 거의 모든 분야(경제, 의료, 교육, 에너지, 환경 등)의 기능과 연결되어 있음을 강조한다. 그래서 다양한 전략 중에서 특히 교통의 상호의존성을 이해하고 협력 체계를 구축하는 것이 회복력 향상에 효과적일 것이라 주장한다.

영국 교통부(Department for Transport: DfT)의 「Transport Resilience Review: A review of the resilience of the transport

network to extreme weather events (DfT, 2014)」는 기상이변(extreme weather: 극심한 장마, 태풍 등)에 대한 대응 및 복구 경험을 재검토하여 교통수단별 회복력을 개선하는 63개 실무적 방안을 제안하였다. 특히 기상이변에 대한 교통체계의 회복력 제고를 위해 세 가지 측면에 주목하였다. 첫째, 기상이변이 발생하여도 사람과 재화의 이동이 가능하도록 교통체계의 물리적 회복력을 높이는 것이다. 둘째, 기상이변 후 교통체계를 가능한 빨리 정상상태로 복구할 수 있는 절차와 과정을 확립하는 것이다. 셋째, 기상이변이 미치는 사회, 경제적 피해를 최소화 하도록 교통 이용자와 분명하고 효과적인 의사소통 방법을 마련하는 것이다.

이 글에서는 미국과 영국, 두 국가의 교통부가 제시하는 구체적인 교통체계 회복력 향상 전략(DoT, 2009; DfT, 2014)을 검토하여 공통적으로 강조되는 8가지 전략 부문을 도출하였다. 표 2는 8가지 전략부문 즉, '합리적 투자 및 재정관리', '계획·지침 수립 및 개정', '교통체계 현황 파악 및 취약성 관리', '협력체계 구축', '교육 및 훈련', '정보제공 및 커뮤니케이션', '기술 개선 및 도입', '법·규정·제도 마련 및 개선'과 각 부문별 미국, 영국의 회복력 향상 전략 예시를 제시한다. 이를 토대로 국내 회복력 향상 전략 수립 방향에 대한 시사점을 살펴볼 수 있다.

먼저, '합리적 투자 및 재정관리'와 관련하여, 충격에 의한 교통체계 성능 저하의 경제적 비용 추정, 교통시설 투자평가시 회복력 관련 평가요소 포함 등 회복력 전략을 추진하기 위한 경제적 필요성이 고려되어야 한다. 또한 장기적 관점에서 기존 교통시설물의 유지관리 재원과 회복력 관련 재원이 함께 고려된 자산관리계획(Asset management plan)이 요구된다.

'계획, 지침 수립 및 개정'과 관련해서는, 충격 특성별 교통서비스 유지 계획과 비상 대응 및 회복 계획이 수립되어야 한다. 계획 수립시 유사 경험을 고려하고, 실행가능성이 높은 순으로 우선순위를

표 2. Transport resilience strategies

전략 부문	전략 예시	
	US DoT (2009)	UK DfT (2014)
합리적 투자 및 재정관리	<ul style="list-style-type: none"> · 교통체계의 위험요소 발현시 지역사회가 받는 사회경제적 손실 파악을 위해 영향분석 개발 및 실시 · 교통시설 투자시 회복력관련 투자 요건 또는 기준 수립 및 평가 · 교통체계의 회복 자원 편성 	<ul style="list-style-type: none"> · 교통체계 단절(disruption)의 경제적 비용 추정 · 회복력 개선 투자의 경제적 타당성 평가 · 장기적 교통시설 투자와 연계된 비상시 복구 투자의 판단기준 수립 · 회복력 유지 및 개선을 위한 자산관리계획 수립
계획, 지침 수립 및 개정	<ul style="list-style-type: none"> · 충격(재난 등)을 대비한 교통서비스 운영 유지 계획과 회복 계획(잔해제거 계획 등) 수립 · 운영 유지 및 회복 계획의 정기적인 검토와 개선 · 충격 발생시 실제 피해를 기반으로 하여 사전 계획된 회복전략 우선순위를 재평가 및 시행 · 충격 이후 회복 경험을 토대로 기존 대응·회복 계획을 재평가 및 개정 	<ul style="list-style-type: none"> · 충격 시나리오별 비상 대응, 회복 계획 수립 · 기존 지침, 계획의 재검토 및 환경변화에 따른 정기적 개정 · 유사 경험을 토대로 대응 방안 수립
교통체계 현황 파악 및 취약성 관리	<ul style="list-style-type: none"> · 위험 평가를 통해 위험 종류와 발생확률 파악 · 비상시 필수 교통서비스 파악 	<ul style="list-style-type: none"> · 사회, 경제적 중요도를 고려한 교통시설물 분류체계 수립 · 교통시설물 일람표 작성 및 정기적인 점검 · 회복자원의 위치, 소유주 등 상세내용이 포함된 체크리스트 작성 및 회복자원의 사전 준비 · 위험 평가를 통한 위험지역(또는 요소) 파악 및 관리전략 수립 · 위험지역의 위기 대책방안의 실행가능성 검토
협력체계 구축	<ul style="list-style-type: none"> · 교통산업 내·외 기업간, 교통산업 기업과 정부간 상호협력조약 체결 및 원조체계 구축 · 지방정부간, 지방정부와 중앙정부간 회복 원조를 위한 상호협력조약 체결 · 국제적 동맹국과 협력체계 구축 · 회복력 관련 모범사례 및 경험에 대한 정보공유 	<ul style="list-style-type: none"> · 지역경계지역 회복에 대한 지방정부간 협력체계 구축 · 연계, 대체 교통서비스 운영자간 협력체계 구축 · 정부주관 교통시설 운영자 대상 워크숍 개최 및 모범사례, 경험에 대한 정보공유
교육 및 훈련	<ul style="list-style-type: none"> · 충격을 대비한 교통서비스 운영 유지 계획과 회복 계획의 정기적인 훈련 · 교육 및 훈련을 통해 위기 대응 및 회복 업무 수행을 장려 	<ul style="list-style-type: none"> · 비상대책계획을 정기적으로 점검 및 예행연습 · 비상시 행동요령, 지침, 모범사례 숙지 및 훈련 · 비상시 운전기술, 사전대비방법 등에 대한 교육자료 검토 및 개선
정보제공 및 커뮤니케이션	<ul style="list-style-type: none"> · 대중에게 효과적인 커뮤니케이션 방법으로 회복 계획의 목표, 활동내용, 진행상황에 대한 정보 공유 · 대중기대 관리 	<ul style="list-style-type: none"> · 교통시설 이용자와 비상시 커뮤니케이션 방안 개발, 계획, 검사 · 정보의 유용성, 신뢰성 개선을 위한 교통시설 이용자와 소통
기술 개선 및 도입	<ul style="list-style-type: none"> · 위험도, 중요도가 높은 교통시설물의 건설, 유지보수에 개선된 장비, 재료, 건설기법 적용 · 예비성(Redundancy) 제고를 위한 복합수단 연계수송 네트워크 (Intermodal transportation network) 도입 	<ul style="list-style-type: none"> · 기후변화 및 기상에 덜 민감한 장비, 장치로 교체 · 회복력 제고를 위한 관련 기술, 정보에 대한 학술 연구 지원
법, 규정, 제도 마련 및 개선	<ul style="list-style-type: none"> · 충격 완화를 위한 건축 규정, 안전 및 환경 규제 등 마련 · 긴급상황시 회복활동 지원을 저해하는 조례, 규제 등을 개정, 완화, 또는 일시적 유보 · 충격 이후 회복 경험을 토대로 기존 법, 규정, 제도를 재평가 및 개정 	<ul style="list-style-type: none"> · 회복력 제고 활동을 저해하는 법, 규정의 개정 · 비상시 교통시설 운영자, 인근지역 소유주의 행동 목표를 설정하고 책임 및 보상 제도를 마련

설정한다. 또한 단기적 복구 계획과 장기적 회복 계획(예컨대 재택근무, 화상회의 등)이 상호 보완 되어야 한다. 충격이 발생한 후에는 실제 피해와

계획 수립단계에서 간과된 중요 교통서비스(예컨대 다수의 인원이 의료서비스를 받아야 하는 상황)를 파악하여 사전 계획된 회복전략 우선순위를

재평가할 수 있어야 한다. 회복 이후에는 회복 경험을 구체화하여 기존 계획 및 지침을 재검토하고 필요시 개정한다.

‘교통체계 현황 파악 및 취약성 관리’ 전략은 위험 요소를 줄이고 충격에 신속히 대응하여 회복력을 높일 수 있다. 예컨대 교통시설물을 사회, 경제적 중요도에 따라 분류하고, 교통시설물과 회복자원 일람표를 작성하여 정기적으로 점검하면 충격에 대한 교통체계의 저항성과 신속성을 높일 것이다. 또한 위험 평가(Risk assessments)로 위험의 종류와 특성을 파악하고, 비상시 실행 가능한 또는 필수적인 교통서비스 제공 방안을 마련하는 등 위험 관리 전략을 수립하면 교통체계의 취약성을 줄일 수 있다.

교통체계는 여러 행정구역에 걸쳐 다중 교통수단, 운영자 등이 연계되어 있을 뿐만 아니라, 지역 사회의 경제, 의료, 교육, 에너지 등 분야의 기능과 상호의존성을 갖는다. 따라서 교통체계의 회복력 향상을 위해서는 ‘협력체계 구축’이 필수적이다. 교통산업 내 연계, 대체 교통서비스 운영기관을 비롯하여 정부 또는 다른 산업 기관과 협력체계를 체결해야 한다. 행정구역 경계 지역 및 국가단위 회복력 제고를 위해 지방정부간, 지방정부와 중앙정부간 상호협력체계도 필요하다. 협력체계를 통해서 비상시 상호 소통 및 협조 방식에 대한 정기적인 협의, 협조기관 담당자 연락목록 구축 및 경신, 모범 사례를 포함한 관련 지식·기술·정보의 공유 등이 이루어져야 한다.

회복계획과 협력체계는 정기적인 ‘교육 및 훈련’으로 점검해야 한다. 교통서비스 제공과 관련된 모든 관계자에게 충격발생시 위기 대응 및 회복에 대한 기대 역할을 숙지시키고, 비상대책계획을 예행 연습해야 한다. 충격이 발생한 후에는 효과적인 ‘정보제공 및 커뮤니케이션’ 전략으로 교통서비스 이용자의 대중기대(public expectation)를 관리하고 피해를 최소로 해야 한다. 회복력 제고와 관련된 기술 및 정보(기후변화 및 기상예민감하지 않은 장비, 복합수단 연계 수송 네트워크 등)에 대

한 연구를 토대로 ‘기술 개선 및 도입’도 이루어져야 한다. 무엇보다 상기 전략들이 활발하게 추진될 수 있도록 ‘법, 규정, 제도 마련 및 개선’이 뒷받침되어야 할 것이다.

지금까지 살펴본 8가지 회복력 향상 전략이 효과적으로 수행되기 위해서는 학술적 논의와 전문적 지식 축적이 선행되어야 한다. 특히 교통 회복력의 경제적 타당성 평가를 위해 여러 종류의 충격이 사회, 경제에 미치는 영향력을 추정하는 방법론이 정교해져야 한다. 이를 위해 충격의 종류, 지속시간, 발생확률, 영향력 등이 논의되어야 한다. 또한 교통체계의 현황 및 제반사항을 효과적으로 파악하기 위해서 사회·경제적 중요도와 취약성을 고려한 교통시설물의 분류체계를 정립해야 한다. 교통체계의 중요도와 취약성은 단순히 경제적 관점으로만 평가하는 것이 아니라, 상황별 필수 교통서비스(의료시설, 소방, 치안, 환경활동과 관련된 교통시설과 경로 등)를 고려하는 등 사회적, 환경적 관점도 주목되어야 한다. 이외에 대중 기대를 효과적으로 관리할 수 있는 커뮤니케이션 방안을 개발 및 평가하고, 교통시설물의 생애주기 비용을 정확히 산정하는 것도 요구된다. 이러한 학술적 논의를 바탕으로 회복력의 가치와 필요성을 가늠하고 회복활동의 우선순위 계획과 충격 및 위험요소 관리 전략을 수립해야 한다.

결론

이 글에서는 회복력의 정의, 속성, 정량화 방법론에 대한 학술 동향과 회복력 향상 전략에 대한 정책 동향을 살펴보았다. 회복력의 정의는 연구마다 조금씩 차이가 있으나 흡수와 회복하는 능력으로 함축할 수 있었다. 또한 흡수와 회복은 한 시점에서 이루어지는 것이 아니라 충격 발생 전, 후에 반복되는 과정이라는 특성을 갖는다. 그래서 여러 선행 연구들은 회복력의 개념과 전략 등을 구체화하기 위해 흡수와 회복 과정을 여러 단계로 구분하였다. 또한 흡수 및 회복 과정의 각 단계에서 발현

되는 회복력의 다양한 속성들, 이를테면 강건성, 예비성, 변통성, 취약성, 유연성, 신속성, 반응성, 저항성, 회복성 등을 제안하고 그 특성과 결정요인을 규명하려는 노력도 진행되었다.

하지만 흡수 및 회복 과정의 구분 방식과 회복력의 대표 속성에 대한 일치된 견해가 없어 이에 대한 추가 논의가 필요해 보인다. 선행 연구에서 제안하는 흡수 및 회복 과정의 구분 방식과 그 차이점을 살펴보고 합리적인 흡수 및 회복 단계를 정립하여야 한다. 또한 회복력의 다양한 속성들의 정의, 위계, 특성 등의 차이를 검토하고, 회복력 개념을 대표하는 속성을 규명하여야 한다. 이후 회복력의 각 속성에 영향을 미치는 요인들이 무엇인지, 속성을 평가하는데 적합한 지표는 무엇인지에 대한 논의가 뒷받침되면 이를 토대로 회복력 향상 전략을 효과적으로 수립할 수 있을 것이다.

회복력의 정량화는 회복력의 수준이 다른 두 상황의 회복력 지표, 예컨대 산출물의 양을 경제적 관점에서 비교하는 방법이 대표적이다. 이 방식은 교통체계의 회복력에 대한 통찰력을 제공하지만, 충격의 결과에 초점이 맞춰진 정량화 방식이라는 점에서 회복력의 과정과 속성에 대한 구체적인 평가보다 전체 결과에 초점을 맞추는 한계를 지적할 수 있다. 흡수 및 회복 과정의 각 단계와 속성에 대한 평가 방법론이 갖춰져야 회복력 향상 전략을 효과적으로 수립할 수 있을 것이다. 또한 충격의 특성별 교통체계에 미치는 영향력과 충격 이후 교통체계의 성능을 추정하는 방법에 대해서도 추가 논의가 필요하다.

US DoT (2009)와 UK DfT (2014)이 제안하는 회복력 향상 전략은 공통적으로 '합리적 투자 및 재정관리', '계획·지침 수립 및 개정', '교통체계 현황 파악 및 취약성 관리', '협력체계 구축', '교육 및 훈련', '정보제공 및 커뮤니케이션', '기술 개선 및 도입', '법·규정·제도 마련 및 개선'을 강조하였다. 그런데 각 회복력 향상 전략의 구체적인 방안들을 효과적으로 수행하기 위해서는 지속적인 학술 연구가 뒷받침되어야 한다. 특히, 충격이 미치

는 사회경제적 영향력 평가, 자산의 생애주기비용 산정, 회복 우선순위 설정, 시설물의 중요도 평가, 교통시설물의 분류체계 정립, 충격의 종류·지속시간·발생확률 파악, 경제·사회·환경적 관점이 접목된 취약성 평가 방법론 등의 발전이 요구된다.

참고문헌

- 이상조 (2015), 접근성 지표를 이용한 도로교통망의 취약성 평가: 서울시 도시고속도로를 대상으로, 서울대학교 석사학위논문.
- Adger W. N. (2000), Social and ecological resilience: are they related?, *Progress in human geography*, 24(3), 347-364.
- Brown D., Kulig J. (1996/97), The concept of resiliency: Theoretical lessons from community research, *Health and Canadian Society*, 4, 29-52.
- Bruneau M., Chang S. E., Eguchi R. T., Lee G. C., O'Rourke T. D., Reinhorn A. M., Shinozuka M., Tierney K., Wallace W., von Winterfeldt D., (2003), A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities, *Earthquake Spectra*, 19(4), 733-752.
- Butler L., Morland L., Leskin G. (2007), Psychological resilience in the face of terrorism, In B. Bongar, L. Brown, L. Beutler, J. Breckenridge, & P. Zimbardo (Eds.), *Psychology of terrorism*, NY: Oxford University Press, 400-417.
- Cardona O. D. (2003), The Notions of Disaster Risk: Conceptual framework for Integrated Management, Information and Indicators Program for Disaster Risk Management, Inter-American Development Bank, Manizales.
- Coles E., Buckle P. (2004), Developing community resilience as a foundation

- for effective disaster recovery, *The Australian Journal of Emergency Management*, 19, 6-15.
- Comfort L. (1999), *Shared Risk: Complex Systems in Seismic Response*. Pergamon, New York, NY.
- Cox A., Prager F., Rose A. (2011), Transportation security and the role of resilience: A foundation for operational metrics, *Transport policy*, 18(2), 307-317.
- Egeland B., Carlson E., Sroufe L. (1993), Resilience as process, *Development and Psychopathology*, 5, 517-528.
- Ganor M., Ben-Lavy Y. (2003), Community resilience: Lessons derived from Gilo under fire, *Journal of Jewish Communal Service*, Winter/Spring, 105-108.
- Godschalk D. (2003), Urban hazard mitigation: Creating resilient cities, *Natural Hazards Review*, 4, 136-143.
- Gordon J. (1978), *Structures*. Harmondsworth, UK: Penguin Books.
- Holling C. (1973), Resilience and stability of ecological systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1-23.
- Holling C. S., Schindler D. W., Walker B. W., Roughgarden J. (1995), Biodiversity in the functioning of ecosystems: an ecological synthesis. In Perrings C., Maler K. G., Folke C., Holling C. S., Jansson B. O. (eds.) *Biodiversity loss: economic and ecological issues*, Cambridge University Press, Cambridge, 44-83.
- Horne J. F., Orr J. E. (1998), Assessing Behaviours that Create Resilient Organisations, *Employment Relations Today*, 24(4), 29-39.
- Jenelius E., Petersen T., Mattsson L-G. (2006), Importance and exposure in road network vulnerability analysis, *Transportation Research Part A*, 40(7): 537-560.
- Jenelius E. (2009), Network structure and travel patterns: explaining the geographical disparities of road network vulnerability, *Journal of Transport Geography*, 17(3): 234-244.
- Klein R., Nicholls R., Thomalla F. (2003), Resilience to natural hazards: How useful is this concept?, *Environmental Hazards*, 5, 35-45.
- Levin S. A., Barrett S., Aniyar S., Baumol W., Bliss C., Bolin B., Dasgupta P., Ehrlich P., Folke C., Gren I.-M., Holling C. S., Jansson A., Jansson B.-O., Maler K.-G., Martin D., Perrings C., Sheshinski E. (1998), Resilience in natural and socioeconomic systems, *Environment and Development Economics*, 3, 222-235.
- Longstaff P. (2005), *Security, resilience, and communication in unpredictable environments such as terrorism, natural disasters, and complex technology*, Syracuse, New York: Author.
- Mallak L. (1998), Resilience in the Health-care Industry, Paper presented at the Seventh Annual Engineering Research Conference, Banff, Alberta, Canada, 9-10 May.
- Manyena S. B. (2006), The concept of resilience revisited. *Disasters*, 30(4), 434-450.
- Martin R., Sunley P. (2014), On the notion of regional economic resilience: conceptualization and explanation, *Journal of Economic Geography*, 1-42.
- Maruyama H., Legaspi R., Minami K.,

- Yamagata Y. (2014), General resilience: Taxonomy and strategies, in Proceedings of the 2014 International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development, 1-8.
- Masten A., Best K., Garmezy N. (1990), Resilience and development: Contributions from the study of children who overcome adversity, *Development & Psychopathology*, 2, 425-444.
- Miletti D. S. (1999), *Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States*, Joseph Henry Press, Washington, DC.
- Norris F. H., Stevens S. P., Pfefferbaum B., Wyche K. F., Pfefferbaum R. L. (2008), Community Resilience as a Metaphor, Theory, Set of Capacities, and Strategy for Disaster Readiness, *American Journal of Community Psychology*, 41(1-2), 127-150.
- Paton D., Johnston D. (2001), Disasters and communities: vulnerability, resilience and preparedness, *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 10(4), 270-277.
- Paton D., Smith L., Violanti J. (2000), Disasters Response: Risk, Vulnerabilities and Resilience, *Disaster Prevention and Management*, 9(3), 173 - 179.
- Pelling M. (2003), *The Vulnerability of Cities: Natural Disasters and Social Resilience*, Earthscan, London.
- Pfefferbaum B., Reissman D., Pfefferbaum R., Klomp R., Gurwitch R. (2005), Building resilience to mass trauma events, In Doll L., Bonzo S., Mercy J., Sleet D. (Eds.), *Handbook on injury and violence prevention interventions*, New York: Kluwer Academic Publishers.
- Reggiani A. (2013), Network resilience for transport security: Some methodological considerations, *Transport Policy*, 28, 63-68.
- Rose A. (2007), Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions, *Environmental Hazards*, 7(4), 383-398.
- Rose A. (2009), *Economic Resilience to Disasters*, CARRI Report No.8. Community and Resilience Institute.
- UK Department for Transport (2014), *Transport Resilience Review: A review of the resilience of the transport network to extreme weather events*.
- UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Risk Reduction) (2005), *Hyogo Framework for 2005 - 2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters*.
- US Department of Transportation (2009), *Recovering from Disasters: The National Transportation Recovery Strategy*.
- Waller M. (2001), Resilience in ecosystemic context: Evolution of the concept, *American Journal of Orthopsychiatry*, 71, 290-297.
- Wildavsky A. (1991), *Searching for Safety*. Transaction, New Brunswick, NJ.