

도시 물 문제 저감을 위한 회복탄력적 사회기반시설 구축: 1. 도시 홍수 문제 구조적 대안의 내구성 평가

Establishment of Resilient Infrastructures for the Mitigation of an Urban Water Problem: 1. Robustness Assessment of Structural Alternatives for the Problem of Urban Floods

이창민 · 정지현 · 안진성 · 김재영 · 최용주*

서울대학교 건설환경공학부

Changmin Lee, Jihyeun Jung, Jinsung An, Jae Young Kim and Yongju Choi*

Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

Received 7 April 2016, revised 20 April 2016, accepted 20 June 2016, published online 30 June 2016

ABSTRACT: Current cities encounter various types of water problems due to rapid urbanization and climate change. The increasing significance of urban water problems calls for the establishment of resilient alternatives to prevent and minimize social loss that results from these phenomena. As a background research for establishing resilient infrastructures for the mitigation of urban water problems, we evaluated the robustness of structural alternatives for urban flood as a representative case. Combining the robustness index (RI) and the cost index (CI), we suggested the robustness-cost index (RCI) as an indicator of the robustness of structural alternatives, and applied the index to assess the existing infrastructures and structural alternatives (i.e., sewer network expansion, additional storage tank construction, and green roof construction) at a site prone to floods located around Gangnam-station, Seoul, Korea. At a rainfall intensity frequency range of 2 to 20 years, the usage of a storage tank and a green roof showed relatively high RCI value, with a variation of an alternative showing greater RCI between the two depending on the size of design rainfall. For a rainfall intensity frequency of 30 years, installing a storage tank with some green roofing was the most resilient alternative based on the RCI value. We proposed strategies for establishing resilient infrastructures for the mitigation of urban floods by evaluating the robustness of existing infrastructures and selecting optimal structural alternatives with the consideration of scales of design disaster.

KEYWORDS: Resilience, Robustness-cost index, Structural alternative, Urban floods, Urban water problems

요 약: 도시 내 인구집중과 기후변화로 인해 다양한 형태의 도시 물 문제가 발생한다. 이에 대한 피해 예방과 사회적 손실 최소화를 위해 회복탄력적인 대안 수립이 필요하다. 본 연구는 도시 물 문제 저감을 위한 회복탄력적 사회기반시설 구축 전략 수립에 관한 기초연구로서 대표적인 도시 물 문제 중 하나인 도시홍수를 사례로 하여 구조적 대안의 내구성을 평가하였다. 내구성 평가를 위한 지표로 내구성 지수 (robustness index, R) 및 비용지수 (cost index, C)를 결합한 내구성-비용지수 (robustness cost index, RC)를 제안하고, 이를 강남역 상습침수구역에 적용하여 기존 기반시설과 구조적 대안 (하수관거 확충, 저류조 설치, 옥상녹화)을 평가하였다. 그 결과, 2~20년 빈도의 강우강도범위에서 저류조와 옥상녹화설치가 상대적으로 높은 RC 값을 나타내었고 두 대안 중 RC 가 보다 높은 대안은 강우강도에 따라 달라지는 경향을 보였다. 30년 빈도 강우강도에 대하여는 저류조와 옥상녹화를 병용 설치하는 대안이 가장 높은 RC 값을 나타내어 가장 회복탄력적인 대안으로 확인되었다. 최종적으로 재해의 계획규모에 따른 현행 사회기반시설의 내구성 평가 및 최적의 구조적 대안 선택 절차를 수립하여, 도시홍수 문제에 대한 회복탄력적 사회기반시설 구축 전략을 제시하였다.

핵심어: 회복탄력성, 내구성-비용지수, 구조적 대안, 도시 홍수, 도시 물 문제

*Corresponding author: ychoi81@snu.ac.kr, ORCID 0000-0002-6187-1446

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

2015년 9월 제 70차 UN 총회에서는 국제사회가 향후 15년간 (2016-2030년) 추진할 새로운 개발목표인 유엔 지속가능발전목표 (sustainable development goal, SDG)를 채택하였다. SDG는 빈곤해소, 양질의 교육 보장, 양성평등 달성 및 위생문제 해결 등을 포함한 17개의 목표와 169개의 세부목표로 구성된다 (SIWI 2015). 특히, 증가하는 인재 및 자연재해에 대해 효과적인 대응이 가능한 사회를 구현하기 위해 제 9항에서는 회복탄력성 (resilience)을 지닌 사회기반시설의 구축을 강조하고 있다.

회복탄력성은 어떤 시스템이 내/외부의 간섭에 의해 본연의 기능을 상실하였을 경우, 정상 상태로 되돌아가는 능력을 의미한다 (Vugrin et al. 2010). 따라서 회복탄력성이 확보된 사회기반시설은 각종 재해에 의한 피해의 규모를 경감시킬 뿐만 아니라 복구에 소요되는 시간을 줄여 사회적 손실을 최소화한다 (Vugrin and Camphouse 2011).

Kim et al. (2014a)은 극한강우사상 (extreme rainfall event)에 따른 댐의 안정성 강화 방안에 대해 회복탄력성 개념을 활용하여 평가한 바 있다. 이는 회복탄력성 개념을 도입하는 것이 하류의 홍수피해를 대안선택의 사결정 과정에 반영할 수 있기 때문이며, 사회 전체의 관점에서 볼 때 바람직한 평가 결과라 판단된다. 또한 Yu et al. (2012)은 사이클론에 의한 피지 (Fiji)의 지역별 방재력을 피해 비용과 복구 비용의 합으로 정의한 회복탄력성 비용 (resilient cost)을 이용하여 평가하였고, 사이클론 취약지역 선정 및 방재력 강화책 모색의 필요성을 강조하였다.

급격한 도시화에 따른 인간 중심의 생활환경과 기후 변화 (climate change)는 다양한 도시 물 문제를 야기한다. 이상고온 현상으로 인한 호소 내 조류 (algae) 및 원생동물 (protozoa)의 번성, 고인구밀도 지역에서의 내생 호르몬 (endogenous hormone)으로 인한 배출수계 (receiving water) 오염과 같은 수질문제가 있다 (Ahn et al. 2014, Hunter 2003, Johnson and Williams 2004). 또한 도시 불투수면적 (impervious surface)의 증가와 극한 강우사상의 빈도 및 강도 증가로 인한 내수침수와 같은 홍수문제가 발생한다 (KMOE 2012).

따라서 도시 물 문제에 의한 피해를 예방하고 사회적

손실을 최소화하기 위해 물 관련 사회기반시설의 증설 및 갱신 (renovation & retrofitting) 계획 시에 회복탄력성 개념을 적용할 필요성이 있다. 특히 재해 분야에서의 회복탄력성은 시스템 기능이 유지되기 위해 필요한 내구성과 생산성, 운영능력이 회복되기 위해 필요한 시간의 차원으로 대표되므로, 계획범위 이내의 재해에 의한 피해를 저감시키기 위한 구조적 대안 (structural alternatives)의 내구성 (robustness) 확보와 예측 불가능한 규모의 재해에 대한 복구 신속성 (rapidity) 확보를 위한 적절한 비구조적 대안 (nonstructural alternatives)의 수립이 중요하다 (Kim et al 2011, Woo 2011, Lee et al. 2014).

본 연구에서는 다양한 도시 물 문제 중 대표적인 도시 홍수 사례인 강남역 인근 상습 침수구역을 중심으로 기존 시설과 후보 대안시설 (구조적 대안)의 내구성을 평가하였으며, 그 기준으로 내구성 지수 (robustness index, *RI*), 비용지수 (cost index, *CI*) 및 내구성-비용지수 (robustness-cost index, *RCI*)를 제시하였다. 이를 이용하여 재해의 규모 (강우강도)에 따른 각 구조적 대안의 도시 홍수 저감 능력을 평가함으로써 회복탄력적인 사회기반시설 구축 및 나아가 회복탄력적 도시 (resilient city) 건설을 위한 기초연구를 수행하고자 하였다.

2. 회복탄력성의 개념과 정량화 방안

2.1 회복탄력성의 정의

회복탄력성은 ‘이전 상태로 되돌아 갈 수 있는 시스템의 능력’을 의미하며 (Holling 1973) 사회생태학, 의학, 심리학 및 방재학 등 다양한 연구분야에서 목적에 따라 다양하게 정의되어 활용되어 왔다 (Garnezy 1985, Rutter 1987, Folke 2006, Shin et al. 2009).

특히, Timmerman (1981)은 회복탄력성을 정의함에 있어서 기반시설 고유의 능력에 더하여 지역사회의 역할을 포함해야 한다고 제안하였다. 즉, 기반시설이 재해에 견디는 속성뿐만 아니라 피해를 복구하는 일련의 과정 또한 회복탄력성을 구성하는 요인으로 본 것이다. 이와 유사하게 Kim et al. (2014a)은 재해로 인해 기반시설이 손상되는 정도는 시설의 구조적 특성에 의존적이지만 손상을 복구하는 과정은 지역사회의 특성 (기술 및 경제수준)과 관련된 문제라고 하였다. 즉, 복구기간 동안 발생하는 사회적 손실을 최소화하는 것은 그 지역

사회의 역량과 직결된다는 관점이다.

Yu et al. (2012)는 재해에 따른 피해비용과 복구비용의 합을 회복탄력성 비용이라 정의하여 지역사회 혹은 국가의 회복탄력성을 평가하기 위해 활용하였다. 일정 규모 이상의 재해가 발생하여 지역사회에 입힌 피해를 비용으로 환산한 것이 피해비용이며, 발생한 피해를 원상태로 회복시키기 위해 소요되는 비용이 복구비용이다. 지역사회의 역량에 따라 변화하는 복구비용을 회복탄력성 정량화 함수의 한 부분으로 구성하였기 때문에 전술한 Timmerman (1981)의 회복탄력성 개념과 일맥상통한다.

2.2 내구성-비용 지수 (안)

다양한 연구자들이 외부 간섭에 대응하는 시스템의 성능을 연구하기 위해 회복탄력성 개념을 활용하고 있으나, 회복탄력성을 정량적으로 평가한 연구는 매우 한정적이다 (Table 1). Bruneau et al. (2003)은 기반시설이 가진 상태를 0에서 100으로 나타내었고, 상태의 손실로부터 회복까지 소요된 시간을 적분하여 시설의 회복탄력성을 나타내었다. Rose (2007)는 정적 회복탄력성을 생산성 변화율의 변동비로, 동적 회복탄력성을 최대와 최소 복구소요 노력에 대한 생산성의 차이로 표현하였다. 또한 전술한 바와 같이 Yu et al. (2012)는 피해비용과 복구비용의 합을 회복탄력성 비용으로 산정

Table 1. Research related to methodologies of quantitative resilient assessments (reproduced from Yu et al. (2012)).

Reference	Equations for resilience assessment	Variables
Bruneau et al. (2003)	$RL = \int_{t_0}^{t_f} [100 - Q(t)] dt$	<p><i>RL</i>: Resilience Loss <i>Q(t)</i>: State of the infrastructure <i>t₀</i>: The time of the event <i>t_f</i>: The time of the recovery</p>
Chang and Shinozuka (2004)	$R = P(A i) = P(r_0 < r^*, t_f < t^*)$	<p><i>R</i>: Resilience, <i>P</i>: Probability, <i>A</i>: Setting standard, <i>i</i>: Scale of disaster, <i>r₀</i>: Initial loss <i>r*</i>: Max allowable loss <i>t*</i>: Max allowable time</p>
Rose (2007)	$\text{Static Resilience} = \frac{\Delta DY^m - \Delta DY}{\Delta DY^m}$ $\text{Dynamic Resilience} = \sum_{i=0}^n Y_{DR}(t_i) - \sum_{i=0}^m Y_{DU}(t_i)$	<p>ΔDY^m: Max rate of change of productivity ΔDY: Rate of change of productivity <i>n, m</i>: Number of observation <i>t_i</i>: The time of <i>i</i>th observation <i>Y_{DR}</i>: Productivity in case of a rapid pace recovery effort <i>Y_{DU}</i>: Productivity in case of a slow pace recovery effort</p>
Vugrin et al. (2010)	$RDR = \frac{\int_{t_0}^{t_f} TSP(t) - SP(t) dt + \alpha \int_{t_0}^{t_f} RE(t) dt}{\int_{t_0}^{t_f} TSP(t) dt}$ $OR = \min_{RE} \frac{\int_{t_0}^{t_f} TSP(t) - SP(t) dt + \alpha \int_{t_0}^{t_f} RE(t) dt}{\int_{t_0}^{t_f} TSP(t) dt}$	<p><i>RDR</i>: Resilience cost index related with specified recovery effort <i>OR</i>: Optimal resilience cost index <i>TSP</i>: Target value of system performance, <i>SP</i>: Present system performance <i>RE</i>: Recovery effort α: Weighted number</p>
Yu et al. (2012)	$RDR(RE) = \int_{t_0}^{t_f} TSP(t) - SP(t) dt + \alpha \int_{t_0}^{t_f} RE(t) dt$	<p><i>RDR</i>: Resilience cost index related with specified recovery effort <i>RE</i>: Specified recovery effort <i>t₀</i>: The time of the event <i>t_f</i>: The time of the recovery <i>TSP</i>: Target value of system performance <i>SP</i>: Present system performance α: Weighted number</p>

하여 그 비용이 낮을수록 회복탄력성이 높음을 나타내었다. 하지만, 정량적 평가를 위해 제시된 식이 Table 1과 같이 존재하는 경우에 대해서도 재해에 따른 시스템의 성능과 시간의 상관관계에 대한 정보의 부재, 상대적인 시설의 상태 표현 등 정량적인 평가 기준의 실제 적용에 어려움을 겪고 있다. 이는 재해의 성격이 유형의 단기적 피해뿐만 아니라 경제, 사회 그리고 삶의 방식에 대한 무형의 장기적 피해를 포함하기 때문으로 판단된다.

본 연구에서는 도시 홍수 문제를 대상으로 현 기반 시설과 구조적 대안들에 대한 회복탄력성을 평가하고자 내구성 지수 (RI), 비용 지수 (cost index, CI) 및 내구성-비용 지수 (RCI)를 제안하였다 (Eq. 1-3). 제안한 지표들은 계획범위 이내의 재해에 의한 피해를 저감시키는 내구성만을 평가하며 (예, 기반시설이 재해에 대하여 견디는 속성), 계획범위를 초과하는 재해 발생 시 그 피해의 복구 신속성에 대한 항목을 포함시키지는 않으므로 회복탄력성을 온전히 반영한다고 보기는 어렵다. 그러나 사회인프라의 내구성을 비용 및 편익의 측면에서 최적화하여 홍수 등 도시 재해에 대한 수용력을 향상시키는 것은 계획범위를 초과하는 피해의 발생 빈도와 발생 강도, 그에 따른 피해 및 복구 비용을 저감시키는 것과 밀접한 관련이 있다. 따라서, 현 기반시설과 구조적 대안들에 대하여 제안한 Eq. 1-3은 사회인프라의 회복탄력성을 평가하는 기본적인 지표로서 충분한 활용 가치가 있다고 판단된다. 이들 지표들은 시설의 용량, 기존 시설과 대안시설의 비용, 홍수 저감능력 등 수집이 용이한 자료를 이용하므로 비교적 손쉽게 활용이 가능하다.

$$RI = \frac{CA + \sum AA}{DS(1 - \frac{AE}{100})} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$CI = \frac{1}{1 + \frac{AC}{CC}} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$RCI = RI \times CI \quad (\text{Eq. 3})$$

여기서, CA 는 현재 기반시설의 용량, AA 는 구조적 대안의 용량, DS 는 재해의 규모, AE 는 구조적 대안의

재해 규모 저감비율, AC 는 구조적 대안의 비용 (건설비, 유지비 등) 및 CC 는 현재 기반시설의 비용이다.

RI 를 통하여 기반시설이 계획 재해의 규모를 감당할 수 있는지 여부를 판단할 수 있다. 계획 재해의 규모가 현 기반시설의 용량을 초과하여 ($RI < 1$) 구조적 대안을 추가적으로 모색해야 할 경우, RI 를 1보다 크게 만드는 후보 대안 (AA)들에 대해 비용을 고려한 RCI 값을 산정하여 최적의 대안 (RCI 가 클수록 우수한 대안)을 선택할 수 있다. RI 와 RCI 를 통하여 재해의 종류 및 규모에 따른 현 기반시설 및 비용을 감안한 구조적 대안의 내구성을 평가할 수 있다.

도시 홍수 문제의 경우, DS 는 확률 강우강도 (mm hr^{-1}), CA 는 현재 배수구역 하수관거의 통수능 (mm hr^{-1}), AA 는 각 대안의 통수능 (mm hr^{-1})이다. 단, 후술할 옥상녹화 설치안의 경우, 현 기반시설의 용량에 더해지는 형태가 아니라, 확률 강우강도를 저감시키는 형태 (i.e., AE 의 형태로)로 식에 반영된다.

3. 도시 홍수 문제의 구조적 대안에 대한 내구성-비용지수 평가

3.1 도시 홍수 사례 (강남역 내수침수) 개요

서울 강남역 일대는 고지 배수지역에서의 표면유출에 의한 저지 배수로의 통수능 초과로 인해 상습적인 침수가 발생하는 지역이다. 2000년 이후에 최소 22.5 mm hr^{-1} 에서 최대 102 mm hr^{-1} 의 일 기준 최대 시간당 강우량의 호우에 의해 5차례 이상의 크고 작은 침수사태가 보고된 바 있다 (KFEM 2013).

지속적인 침수 피해를 방지하기 위해 삼성사옥 역경사 하수관 개선, 용허리 빗물 저류조 유입관 신설 및 고지대 빗물 유입시설 확충 계획이 수립되어 있다. 또한 고지 배수지역인 역삼동부터 강남역 사이의 역경사 관로 구간 230 m에 분리벽을 만들어 역삼동에서 흐르는 빗물을 초기에 하수관으로 분산하는 대안을 수립한 바 있다. 마지막으로 반포천의 통수능력 확대를 위해 2019년 우기 전까지 공사비 총 348억 원을 들여 직경 7.5 m, 연장 1.3 km의 유역분리터널을 설치할 계획이다.

본 연구에서는 실제 강남역 인근 지역의 침수피해 방지 대책으로 수립되어 있는 저류조 설치 및 하수관망 개선 공사와 함께 도시 우수 침투시설의 하나인

옥상녹화 (green roof)를 고지 배수지역 유출량 저감 기법으로 선정하였으며, 이들 구조적 대안에 대해 회복탄력성 평가를 위해 내구성-비용 지수를 적용해보았다.

3.2 내수침수 방지 대안의 내구성 평가

3.2.1 기초자료 및 가정

강남역 인근 지역 내수침수 방지 대안들의 내구성 평가를 위한 기초자료 조사 및 가정수립을 수행하였다. 현 강남대로 사거리 우수배제 시스템의 최대 허용 강우강도는 2012년 하수관거 개선공사 이후 침수피해 발생사례 중 하나인 51.5 mm hr¹로 설정하였다. 한편, 강남대로 하수관 설계 관련도서 검토보고서 (KFEM 2013) 내 자료를 이용하여 하수관망 및 저류조의 설치비용 및 시스템 용량을 가정하였다 (Table 2). 옥상녹화는 건축물 옥상녹화 시스템 유형 결정과 관리 매뉴얼 (Seoul 2007)과 Nam et al. (2013)이 제시한 분류 중 기존의 건축물에 시공이 용이한 경량형 (토심 < 20 cm, 오탁형) 기법을 적용한다고 가정하였다. 하수관거 통수능 개선 및 저류조 설치 방안과는 다르게, 옥상녹화의 경우 배수구역 단위의 계획이 아니기 때문에, 구역 내 옥상녹화 면적이 중요한 인자 중 하나이다. 이에 따라 옥상녹화 면적에 따라 재해의 규모에 따른 영향이 어떻게 변화하는지 관찰하기 위해, 확률 강우강도를 합리식을 통해 환산한 유량 값을 옥상녹화 평가 시 활용하였다. 옥상녹

화 설치비용은 공사비, 운영 및 유지관리비, 안전관리비 및 환경비를 포함하여 옥상녹화 설치에 따른 경제성 평가를 수행한 Kim et al. (2014b)의 연구를 바탕으로 배수구역 면적 대비 20% 설치 시 127억원, 40% 설치 시 255억원 및 80% 설치 시 510억원으로 책정하였다.

3.2.2 내구성-비용 지수 평가

재해의 규모 (n년 빈도 확률 강우강도의 변화)에 따른 후보 대안 시스템의 내구성-비용 지수를 Fig. 1에 나타내었다. 기존 및 대안 시스템의 용량이 강우를 수용할 수 있어야 침수피해가 발생하지 않을 것이기 때문에, 일차적으로 계획 재난의 규모를 감당할 수 있는 대안 ($RI > 1$)을 선택해야 하며, 내구성이 확보된 대안들에 대해 경제적 요인을 반영한 비교를 위해 건설비 등의 소요 비용을 감안한 내구성-비용 지수를 활용하였다.

2년 빈도 강우강도에 대해 배수구역 면적 대비 80%의 옥상녹화를 진행하는 대안이 가장 큰 내구성-비용 지수 값을 보였으며, 2년 초과 30년 미만 빈도 강우강도에 대해 저류조 설치안이 가장 큰 내구성-비용 평가지수 값을 보였다 (Fig. 1). 규모가 작은 강우의 경우, 이를 충분히 감당할 수 있는 저렴한 옥상녹화 설치안의 내구성-비용 평가지수가 높다. 또한 강우의 규모가 커질수록 옥상녹화 설치안의 내구성 확보가 불가능해지기 때문에 상대적으로 하수관거 통수능 개선안에 비해 비용이 저렴하며 강우를 감당할 수 있는 저류조 설치안의 내구성-

Table 2. Basic information of area prone to flood near Gangnam-station for assessing robustness index (RI), cost index (CI), and robustness cost index (RCI) values.

Data type	Value		Reference and/or note
Maximum rainfall intensity of system	51.5 mm/hr		2012 rainfall intensity records (Gangnam-daero intersection)
Current drainage area	300,000 m ² (500 m × 600 m)		Area of Gangnam-daero intersection
Sewer network construction cost	26.2 billion won/1 unit		2012 Sewer network expansion plan of Gangnam-daero intersection (total length 1,300 m) for preventing 75 mm/hr (10 year rainfall intensity frequency)
Storage tank construction cost	20 billion won/1 unit		For preventing 85 mm/hr rainfall intensity (25,000 m ³) (flood damage prevention plan for Gangnam-gu)
Green roof construction cost	Light weight & extensive type	2 hundred thousand won/m ²	30 mm/hr of rainfall intensity reduction in soil depth of 20 cm
Runoff coefficient of green roof	0.2		Gentle slope green area: 0.1 - 0.25

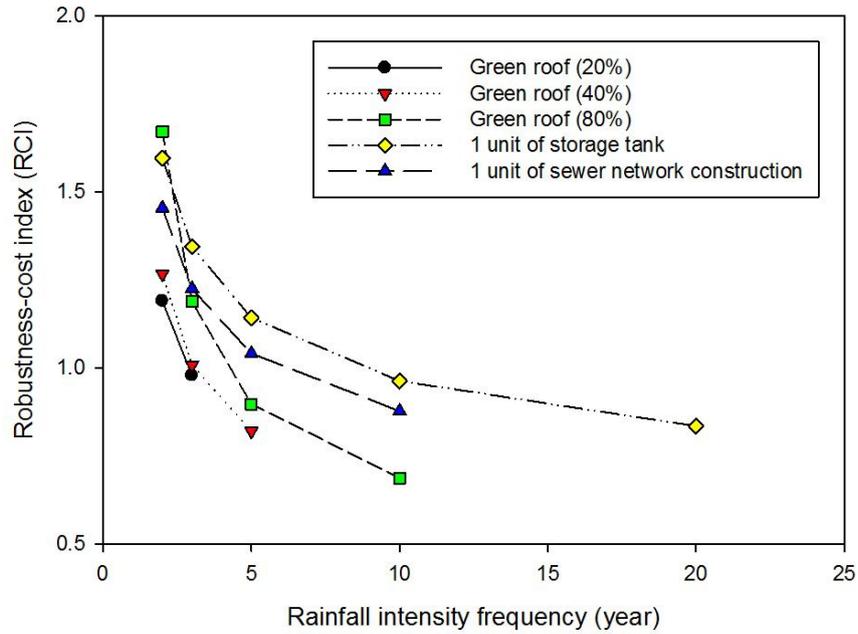


Fig. 1. Comparison of robustness-cost index (RCI) values among three different alternatives (i.e., sewer network expansion, rainwater storage tank, green roof installation) for the mitigation of urban flooding. Scenarios to install green roofs were established to cover 20, 40, and 80% of total drainage basin area.

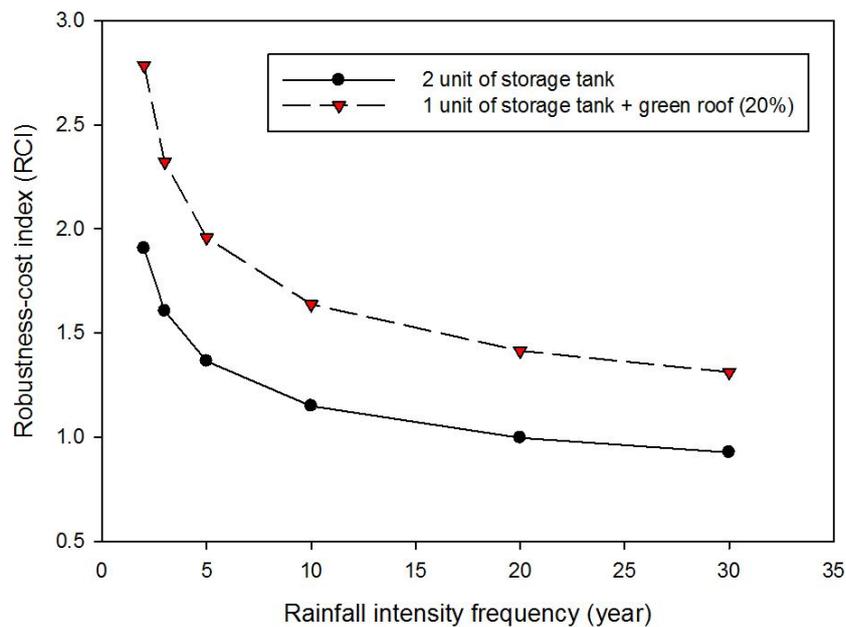


Fig. 2. Comparison of robustness-cost index (RCI) values between alternatives of installing 2 units of rainwater storage tank and 1 unit of rainwater storage tank with 20% of green roof in the drainage basin.

평가지수가 높은 값을 보인다.

한편, 30년 빈도 강우강도에 대해 모든 대안들 (예, 25,000 m³ 용량 저류조 1기 설치, 1,300 m 규모 하수 관거 개선, 경량 및 저관리형 옥상녹화)에서 침수피해가 발생할 것으로 예상되기 때문에, 저류조 2기 설치안과 저류조 1기와 옥상녹화 (배수구역 면적 대비 20%) 병

용 설치안을 추가 대안으로 선정하여 비교하였다 (Fig. 2). 비교 결과, 각각 2, 3, 5, 10, 20, 30년 빈도 강우강도에 대해 저류조 2기 설치안의 RCI는 1.91, 1.61, 1.37, 1.15, 1.00, 0.93으로 나타났고 저류조 1기와 옥상녹화 20% 병용 설치안의 RCI는 2.78, 2.32, 1.96, 1.64, 1.41, 1.31으로 나타났다. 따라서 저류조 추가설

치에 비해 시공 단위가 작은 옥상녹화를 통해 계획 재해의 규모 증가를 감당하는 것이 보다 효과적인 대안으로 판단된다.

서울시는 현재 배수구획 별로 40-60 mm hr⁻¹의 강우 대응 수준을 보인다. 서울시 중장기 치수계획에 따르면, 향후 10년간 침수취약지역에 기반시설 확충 (예, 저류조 건설, 하수관거 확충, 빗물 펌프장 신설)을 통해 95 mm hr⁻¹의 강우에 대응할 수 있는 구조적 대안을 수립할 계획이다. 한편, 서울의 기왕 최대강우인 118.6 mm hr⁻¹의 강우에 대응하기 위해, 그린인프라 (green infrastructure) 정비를 통해 도시 물 순환을 개선하고 (예, 침투량 증가, 침투 유출량 저감) 이를 통해 100 mm hr⁻¹의 강우를 감당하고자 하며, 비구조적 대안으로써 홍수 예/정보 제도 및 대응체계 구축을 통해 기왕 최대강우에 대해 적응해 나갈 계획이다 (Seoul 2015). 또한 홍수방재계획상의 종류, 범위에 대해 적응, 발달시킨 내구성 (예, 저류 가능한 최대 수위)이 다른 종류의 재해 (예, 저류조 붕괴위험)에 대한 취약성 (vulnerability)을 증대시킬 수 있는 가능성 (Janssen et al. 2007)을 배제하지 못하는 한계가 있는데, 이는 비구조적 대안의 강화를 통해 보완할 수 있는 부분으로 본 연구의 구조적 대안의 내구성 평가 결과뿐만 아니라 비구조적 대안의 필요성 부분과도 일치하는 결과이다. 따라서 서울시의 향후 중/장기 치수계획이 도시 회복탄력성 확보 측면에서 바람직하다고 평가할 수 있다.

3.3 도시 내 그린인프라의 역할

그린인프라는 생태계가 인간에게 주는 혜택, 즉 생태계 서비스를 유지 및 활용하기 위해 도시 내 자연적인 공간을 확보하고 이들을 상호 연결하여 생태계 기능이 올바르게 유지될 수 있도록 도모하는 기법을 의미한다 (Lee et al. 2014).

옥상녹화를 포함한 그린인프라의 경우, 열섬 효과 저감 및 에너지 절약, 자외선 직접 노출 방지에 따른 지붕 차수막 수명 연장, 우수 유출수 수량 및 수질 제어, 소음 저감, 화재 저항성, 어메니티 (amenity) 확보 및 주민참여 증진, 작물생산, 대기오염물질 저감, 온실가스 배출 저감 및 생물서식처 제공을 통한 생물다양성 증진과 같은 다양한 효과를 가진다 (Peck and Kuhn 2003).

따라서 극한 강우사상에 대비하기 위한 회복탄력적 대안 선택 과정에 있어서 저류조와 같이 비용 대비 내구

성이 뛰어난 대형 구조물의 설치도 반드시 필요하나, 대형 구조물로 일몰화된 대안보다는 옥상녹화와 같은 소규모 분산형 시설을 병용하는 대안을 통해 보다 효과적인 도시 우수배제 시스템을 구축할 수 있을 뿐만 아니라 다양한 생태적 기능을 획득할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 도시 홍수 문제 저감을 위한 회복탄력적 사회기반시설 구축 전략

인간중심으로 조성된 생활환경과 기후변화로 인해 도시 물 문제는 점점 심해지고 있다. 그 중에서도 불투수면적 증가와 극한 강우사상 빈도 및 강도의 증가로 인한 도시 홍수 문제가 심각한 상황이다. 따라서 도시 홍수로 인한 피해 예방 (대비)과 사회적 손실을 최소화 (대응 및 복구)하는 회복탄력성을 포함 할 수 있도록 하는 구조적 대안의 구축 전략이 필요하다.

최우선적으로 위험요인을 명확히 인식하기 위해, 재해의 계획 규모를 설정할 필요가 있다. 예를 들어, 도시 홍수 예방을 위한 구조적 대안을 마련함에 있어서 계획 확률강우강도가 기준이 되기 때문이다. 3절에서 살펴본 바와 같이 계획 재해의 규모를 달리함에 따라 최적의 구조적 대안이 달라질 수 있기 때문에 합리적인 재해 규모 설정이 필수적이다.

이후, 현행 사회기반시설의 내구성을 평가해야 한다. 계획 재해의 규모를 기준으로 현재 기반 시스템의 성능을 평가함으로써 재해 취약지역을 선정할 수 있고, 구조적 대안을 설치하여 재해의 규모를 경감할 필요가 있을 경우에 후보 대안들에 대해 내구성-비용 평가를 수행해야 한다. 본 연구에서는 도시 홍수 문제에 대해 내구성-비용 분석을 수행하여 최적의 구조적 대안을 선정하는 사례를 살펴보았는데, 모뎀화 되어있는 대안 (혹은 소규모 설치 가능한 대안)이 합리적임을 알 수 있다.

또한 계획 재해의 규모를 초과하거나 예상치 못한 사고에 의해 발생하는 피해의 경우, 신속한 복구가 가능하도록 하는 비구조적 대안이 필요하다. 비구조적 대안들이 포함하는 법적, 제도적인 대책을 통해 지역사회의 피해 저감과 적응의 노력을 효율적으로 활용할 수 있기 때문이다. 따라서 구조적 대안과 비구조적 대안을 병용해 재해의 저감, 적응에 대처하는 종합적인 전략 수립이 연구 될 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2015R1A5A7037372).

References

- Ahn, S.R., Ha, R., Yoon, S.W. and Kim, S.J. 2014. Evaluation of future turbidity water and eutrophication in Chungju-lake by climate change using CE-QUAL-W2. *Journal of Korea Water Resources Association* 47: 145-159. (in Korean)
- Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W.A. and von Winterfeldt, D. 2003. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra* 19: 733-752.
- Chang, S.E. and Shinozuka, M. 2004. Measuring improvements in the disaster resilience of communities. *Earthquake Spectra* 20: 739-755.
- Folke, C. 2006. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change* 16: 253-267.
- Garmezy, M. 1985. Stress-resistant children: The search for protective factors. *Recent Research in Developmental Psychopathology* 4: 213-233.
- Holling, C.S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4: 1-23.
- Hunter, P.R. 2003. Climate change and waterborne and vector-borne disease. *Journal of Applied Microbiology* 94: 37-46.
- Janssen, M.A., John, M.A. and Elinor, O. 2007. Robustness of social-ecological systems to spatial and temporal variability. *Society and Natural Resources* 20: 307-322.
- Johnson, A.C. and Williams, R.J. 2004. A model to estimate influent and effluent concentrations of estradiol, estrone, and ethinyl estradiol at sewage treatment works. *Environmental Science & Technology* 38: 3649-3658.
- KFEM. 2013. Review Report of Publications of Gangnam-dearo Sewer Network Design. Korean Federation for Environmental Movement, Seoul, Korea. (in Korean)
- Kim, B.I., Shin, S.C. and Kim, D.Y. 2014a. Resilience assessment of dam's flood-control service. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 34: 1919-1924. (In Korean)
- Kim, H.S., Choi, J.Y. and Shin, E.H. 2014b. Economic analysis based on the type of green roof initiatives: the case of Jung-gu Seoul. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design* 30(10): 159-167. (in Korean)
- Kim, T. H., Kim, H.J. and Lee, K.J. 2011. The concept and functional objectives of the urban resilience for disaster management. *Journal of the Korean Society of Safety* 26: 65-70. (in Korean)
- KMOE. 2012. Drainage System Maintenance Plan against Urban Flood. National Policy Coordination Meeting. Korean Ministry of Environment, Sejong, Korea. (in Korean)
- Lee, E.S., Noh, C.W. and Sung, J.S. 2014. Meaning structure of green infrastructure – a literature review about definitions. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 42: 65-76. (in Korean)
- Nam, M.A., Jang, D.H. and Kim, H.S. 2013. A study on runoff water reduction effects according to shapes of formation of artificial soil green area in multi-housing complex. *Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment* 13: 9-15 (in Korean)
- Peck, S.W. and M. Kuhn. 2003. Design Guidelines for Green Roofs. Ontario Association of Architects, Ottawa, Canada.
- Rose, A. 2007. Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions. *Environmental Hazards* 7: 383-398.
- Rutter, M. 1987. Psychosocial resilience and protective mechanisms. *American Journal of Orthopsychiatry* 57: 316-331.
- Seoul. 2007. System Type Decision & Management Manual for Green Roof Building. Seoul Metropolitan Government, Seoul, Korea. (in Korean)
- Seoul. 2015. 2020 Seoul Metropolitan City Master Plan for Water Environment Management. Seoul Metropolitan Government, Seoul, Korea. (in Korean)
- Shin, S.J., Jung, D.Y. and Hwang, E.H. 2009. Concept analysis of resilience in patients with cardiovascular diseases. *Journal of Korean Academy of Nursing* 39: 788-795.

- SIWI. 2015. Water for Development: Charting a Water Wise Path. Stockholm International Water Institute, Stockholm, Sweden.
- Timmerman, P. 1981. Vulnerability Resilience and Collapse of Society: A Review of Models and Possible Climatic Applications. Institute for Environmental Studies, University of Toronto, Toronto, Canada.
- Vugrin, E.D. and Camphouse, R.C. 2011. Infrastructure resilience assessment through control design. *International Journal of Critical Infrastructures* 7: 243-260.
- Vugrin, E.D., Drake, E.W., Mark, A.E. and Camphouse, R.C. 2010. A framework for assessing the resilience of infrastructure and economic systems. In, Gopalakrishnan, K. and Peeta, S. (eds.), *Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems*, Springer, Berlin Heidelberg, New Mexico, USA. pp. 77-116.
- Woo, H.S. 2011. Prevention of urban flood due to climate change. *Journal of Civil Engineering* 59: 5-7. (in Korean)
- Yu, S.Y., Kim, S.W., Park, K.H., Oh, C.W., Park, D.K. and Kim, C.Y. 2012. Quantitative resilience analysis of Fiji to cyclones. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 12: 55-63. (In Korean)