도시침수 시 도시계획시설의 방재회복력 분석

Evaluation of Disaster Resilience of Urban Planning Facilities Against Urban Flood

박기용* · 원정훈**

Park, Kiyong*, and Won, Jeong-hun**

Abstract

In this study, the effect of urban planning facilities on the resilience from disaster was analyzed with the focus on urban space as a non-structural measure against urban flood damage. The analysis was conducted by evaluating relative values using a decision-making system—analytic network process (ANP)—with the network structure based on the four functional features of recovery: robustness, redundancy, resourcefulness, and rapidity. The study results indicated that disaster-prevention facilities showed the highest recovery efficiency followed by space, traffic, public-cultural-athletic, environmental, health and sanitary, and distribution and supply facilities, in respective order. Therefore, facilities with high recovery efficiency should be primarily planned and installed in areas that are vulnerable to urban flood damages. In addition, facilities with less recovery efficiency should be planned in areas that are relatively safe from flooding in order to increase the overall recovery efficiency to minimize damage from flooding.

Key words : Urban Planning Facilities, Resilience, ANP, Urban Flood

요 지

본 연구는 도시침수 피해가 발생하였을 경우, 비구조적 측면의 대책으로써 도시공간적인 부분에 초점을 맞추어 도시계획시설의 방재회복력 효과를 분석하였다. 회복력의 4가지 기능적 특성인 내구성, 대체성, 자원 동원력, 신속성에 근거하여 네트워크 구조의 의사결정 시스템(Analytic Network Process, ANP)을 적용하여 도시계획시설의 방재회복력에 대하여 상대적 가치평가를 수행하였다. 분석 결과, 방재시설이 가장 높은 회복력을 나타냈으며, 그 뒤로 공간시설, 교통시설, 공공·문화체육시설, 환경기초시설, 보건위생시설, 유통 및 공급시설의 순으로 점차 회복력이 낮아지는 것으로 분석되었다. 따라서 도시침수 위험지역에는 방재회복력이 높은 시설을 우선적으로 계획·설치하여야 하며, 침수로부터 안전한 지역에는 방재회복력이 낮은 시설을 계획·설치하여 회복력을 높이는 것이 타당하다고 판단된다.

핵심용어 : 도시계획시설, 방재회복력, ANP, 도시침수

1. 서 론

기후변화로 홍수의 가능성과 피해의 불확실성은 증가하고 있다. 홍수는 직접적인 인명피해 외에도 2차 피해인 도시 기반시설과 건축물의 붕괴 및 손상 등을 유발하므로 홍수가 발생할 경우 막대한 경제적 손실이 발생하게 된다. 국토차원에서 보면, 해당 시설이 위치한 지역적 입지가 시설의 특성보

다 영향이 크게 된다. 또한, 홍수에 의한 피해가 발생하는 도시기반시설의 기능은 생활, 산업 등과 연관이 깊으므로 2차 피해로 확산될 수 있다. 홍수피해지역에서 발생한 건축물 침수피해는 구조적 및 내구성의 측면에서 건축물의 외벽을 부식시키고 건물의 노화를 유발하는 요인이므로 장기적으로는 건축물의 재산가치가 하락하게 된다(Lee et al., 2018). 도시유역의 침수방지 대책은 구조적 대책(Structural Solution)

*정회원, 충북대학교 방재공학과 연구교수(E-mail: pky3489@chungbuk.ac.kr)

Member, Research Professor, Department of Disaster Prevention, Chungbuk National University

**교신저자, 정회원, 충북대학교 안전공학과 교수(Tel: +82-43-261-2459, Fax: +82-43-265-2457, E-mail: jhwon@chungbuk.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

과 비구조적인 대책(Non-Structural Solution)으로 분류할 수 있으며, 방재시설 중심의 구조적 대책이 기본적으로 적용되고 있다. 방재시설 중심의 대책은 대상지역과 시설의 중요도에 따라 규정된 설계기준과 시설용량이 중요한 역할을 하나, 설계기준을 초과하는 집중 호우에 대해서는 방어능력이 취약한 문제점을 갖고 있으므로 방재시설 중심의 대책은 방어능력이 제한적이라는 한계를 갖고 있다.

특히, 기후변화와 도시화에 따라 집중호우의 발생빈도가 증가하는 오늘날의 상황은 더욱 그러하다(IPCC, 2007). 구조적 대책의 제한적인 방어능력을 극복하기 위해 최근 해외 도시들은 방재시설 중심의 구조적 대책에 각종 비구조적인 대책을 보완하는 통합적 접근으로 전환하고 있다(Ahn, 2010; Shin and Kim, 2011). 즉, 구조적 대안을 보완하기 위한 비구조적인 방재대책의 역할이 중요시 되고 있는 것이다(Shin et al., 2015).

비구조적인 대책의 기본적인 대책으로는 법이나 규제 등의 정비와 조직 체제 확립, 방비체제 충실, 인재육성, 재해 관리기술 향상(토지이용계획, 건축규제, 시가화예정지 선정, 도시기반시설 정비계획, 인구배치계획, 교통망 정비계획 등), 방재정보시스템 정비(토지이용현황, 도로이용 및 관리 현황, 건축물 정보현황 등 도시의 물리적 현황을 조사 및 분석하고 Hazard map 작성) 등이 있다(Kaji, 2011). 주목할 점은 비구조적인 대책 중 토지이용 및 건축물 등과 관련된 도시계획적 대책 부분에 대해서는 아직까지 연구가 부족하다는 것이다.

도시계획적 저감 대책의 또 다른 방안으로 『국토의 계획 및 이용에 관한 법률』상의 기반시설 중 도시관리계획으로 결정된 시설을 활용하는 방법이다. 도시계획시설은 도시주민의 생활과 도시기능 유지에 필요한 시설이며, 자연재해에 대하여 온전히 피해를 받는 시설과 2차 피해시설, 그리고 방재기능을 하는 시설로 구분이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 도시계획의 중요한 기반시설이라고 할 수 있는 도시계획시설의 방재 회복력을 분석하여 그 대응방안을 모색하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 침수피해의 원인 및 유형

침수피해 원인과 영향인자 검토결과를 분석의 관점과 정밀도에 따라 Fig. 1과 같이 자연적 요인에 해당하는 강우조건, 고도와 사면과 같은 지형조건, 토지이용(용도지역) 조건, 그리고 방재시설과 배수시설과 같은 시설적 조건 등으로 구분될 수 있다. 침수 피해는 개별 요인보다는 다양한 요인들이 상호작용을 발생시키고, 우수의 수리 및 수문학적 특성에 영향을 주어 침수피해로 나타나게 된다(Park and Lee, 2018). 침수피해는 인명피해, 재산피해, 도시기능 피해 등으로 구분될 수 있다. 대부분의 침수피해는 호우나 태풍에 의해 발생하고 예측이 일정수준 가능하므로 최근에는 인명피해보다는

재산피해와 도시기능 피해가 주요 피해의 형태로 나타난다(Shin and Kim, 2011).

*Source: Park and Lee, 2018

Fig. 1. Influence Factors of Flood Damage

2.2 회복력의 개념

회복력(resilience)의 의미는 한계성(marginality), 민감성(susceptibility), 적응성(adaptability), 연약성(fragility), 위험(risk) 등과 혼용되고 있으며(Liverman, 1990), 일반적으로는 충격, 변화 또는 스트레스로부터 신속하게 회복할 수 있는 능력으로 정의한다(Bruneau et al., 2003). 연구자들은 환경 및 사회의 상호작용하는 시스템에서 볼 수 있는 수많은 특성들을 분석하여 회복력은 대체성, 효율성, 다양성, 상호의존성, 유연성의 조합이 필요함을 지적했다(Zimmerman, 2001; Godschalk, 2003). Bruneau et al. (2003)과 Tierney and Bruneau (2007)는 내구성(robustness), 대체성(redundancy), 자원 동원력(resourcefulness), 신속성(rapidity)을 나타내는 회복력의 4R 프레임워크를 제안했다. 회복력의 기능적 목표 및 요소를 세부적으로 설명하면 Table 1과 같다.

회복력이라는 차원에서 방재력(Prevention of Disaster)의 측정 또한 중요한 요소라고 할 수 있다. 각 시설들이 재해로부터 직·간접적인 피해를 받는지 또는 재해를 방지·저감에 대한 기능을 수행하는지는 회복력과의 밀접한 관련이 있다(NDMI, 2010). 한 섹터에서의 분열은 순차적으로 다른 섹터에 영향을 미치기 때문에 기반시설들이 상호의존적일수록 회복력은 낮게 나타난다(McDaniels et al., 2008). 도시 전체의 시스템은 하나의 생명체처럼 상호 유기적으로 연결되어 있으며 시설의 중요도에 따라 다르겠지만 하나의 시설이 피해를 받으면 도시전체에 영향을 미칠 수도 있는 것이다. 따라서 모든 상호적인 차원에서 회복력을 측정할 수 있는 연구가 반드시 필요하다고 할 수 있다.

2.3 도시계획시설

도시계획시설이란 도로, 공원, 시장, 철도 등 도시주민의 생활이나 도시기능의 유지에 필요한 『국토의 계획 및 이용에 관한 법률』에서 규정한 기반시설 중 도시관리계획으로 결정된 시설로써 Table 2와 같이 분류된다.

Table 1. 4R Framework of Resilience

4R Framework	Definition
Robustness	Strength, or the ability of elements, systems, and other units of analysis to withstand a given level of stress or demand without suffering degradation or loss of function
Redundancy	The extent to which elements, systems, or other units of analysis exist that are substitutable, i.e., capable of satisfying functional requirements in the event of disruption, degradation, or loss of functionality
Rapidity	The capacity to meet priorities and achieve goals in a timely manner in order to contain losses and avoid future disruption
Resourcefulness	The capacity to identify problems, establish priorities, and mobilize resources when conditions exist that threaten to disrupt some element, system, or other unit of analysis; resourcefulness can be further conceptualized as consisting of the ability to apply material (i.e., monetary, physical, technological, and informational) and human resources to meet established priorities and achieve goals

Source: Tierney and Bruneau, 2007.

Table 2. Urban Planning Facilities

Group of facilities	Items
Traffic facilities	roads, railways, harbors, airports, parking lots, automobile depots, tracks, canals, inspection facilities for automobiles and construction equipment, and automobile and construction equipment driving schools
Space facilities	squares, parks, green areas, amusement parks, and vacant public land
Distribution and Supply facilities	distribution business facilities, water, electricity, gas and heat supply facilities, broadcasting and communications facilities, utility tunnels, markets, oil-storage, and oil supply facilities
Public, Cultural and Athletic facilities	schools, athletic fields, public buildings, cultural facilities, athletic facilities, research facilities, social welfare facilities, public vocational training facilities, and juvenile training facilities deemed necessary for public use
Disaster-prevention facilities	rivers, detention ponds, reservoirs, fire prevention facilities, windbreak facilities, waterproof facilities, erosion control facilities, and tide-control facilities
Health and Sanitary facilities	cremation facilities, cemeteries, charnel facilities, natural burial grounds, funeral parlors, slaughterhouses, and general medical facilities
Environmental facilities	sewage systems, waste treatment facilities, prevention facilities for water pollution, and auto junkyards

Source: Enforcement Decree of the National Land Planning and Utiliza ACT. Article 2 (Infrastructure)

■ : Selection of Evaluation Index of Urban Planning Facilities

앞서 설명한 회복력의 개념을 바탕으로 도시계획시설을 방재 회복력 관련 지표로 선정한 이유는 다음과 같다. 첫째, 시설적인 부분에서 수많은 기관, 조직 및 요소가 회복력에 기여를 한다. 이러한 시설들은 도시 기능적인 부분에서의 문제가 없도록 하는 시설과 비상 대응 관리와 같은 중요한 기능을 하는 시설들은 전체적으로 회복력을 향상시키는데 매우 중요한 역할을 한다(Buneau et al., 2003). 둘째, 2004년에서 2013년 기간 중 약 10년간 자연재해로 인한 시설별 피해현황을 살펴보면 도로, 기반시설 등 공공시설 피해(직접 피해)가 65%로 가장 큰 비중을 차지한다(Shin, 2014). 셋째, 기술적 차원에서의 회복력은 재해 발생 시 물리적 시스템의 성능을 나타내며(McDaniels et al., 2008)수용 가능하거나 원하는 수준으로 복구가 가능한 시스템이 본래의 기능을 할 수 있는 물리적인 영향력(구성요소, 상호 작용 및 전체 시스템을 포함)을 나타내며, 중요한 시설을 관리하고 재난 관련 기능을 수행 할 수 있는 역량도 함께 나타낸다(Buneau

et al., 2003). 넷째, 도시계획시설은 대부분 도시 내에 위치하고 있으며, 도시방재 회복력을 측정하기 위해서는 상당한 경제적 규모의 자산이 필요하다. 따라서 공공이 먼저 투자를 하여 그 실효성을 입증할 필요가 있다.

재난으로부터 도시 내에 있는 모든 공간과 건축물, 그리고 시설들은 기본적으로 방재의 대상이 되는 것이 원칙이다. 침수피해는 도시의 공간, 도시의 시설에 직접적으로 영향을 주는 자체적인 피해로만 끝나지 않으며 도시기능 마비와 같은 2차 피해를 발생시켜 피해의 정도를 심화시킨다. 다만, 도시계획시설의 특성상 방재기능 시설과 방재대상 시설 등의 분류로 인해 방재 수준의 차이가 발생하게 된다. 즉, 자연재해로부터 온전히 피해를 받는 시설과 방재기능을 하는 시설로 구분이 가능하다. 따라서 도시계획의 중요한 기반시설이라고 할 수 있는 도시계획시설이 도시 침수로부터 도시의 회복력에 미치는 영향이 다를 것으로 판단되며, 도시계획시설과 회복력과의 관계를 분석하고자 한다.

2.4 방재 회복력 분석방법

사물이나 현상에 대해 가치를 측정함에 있어 물리적 수치를 활용하여 가치를 평가하는 방법 외에도 상대 평가를 활용하여 상대 가치를 평가할 수 있다. 특히, 다양한 대안 중에서 의사결정(Decision-making)을 해야 할 경우에는 상대적 가치평가가 유용하게 사용될 수 있다(Saaty, 2005). 본 연구에서는 비교 및 평가하고자 하는 목표와 기준, 대안 상호간의 종속성, 피드백을 분석과정에서 반영할 수 있는 Analytic Network Process (ANP)를 적용하여 방재회복력을 분석하였다(Saaty, 1996). 분석을 위한 툴은 Super decisions 2.8.0이 사용되었다.

브레인스토밍(Brainstorming)에 참가하는 집단 구성 인원수에 대해 Arnold (1992)와 Osborn (1953)에 의해 6-12명 정도가 참여하는 집단 활동으로 개발되었지만, 오히려 개별로 진행하거나 또는 2-3명이 진행할 때 그 효과가 더 우수하다는 연구 결과를 발표하였다(Arnold, 1992; Osborn, 1953).

본 연구에서는 도시계획시설에 대한 평가대상을 기준으로 회복력을 평가하기 위해 도시계획시설의 세부지표 선정 및 평가지표 간의 상관성을 분석하였다. 도시계획 및 도시방재 관련 전문가(3인)와 함께 18년 10월~11월 동안 3회에 걸쳐 논의(Brainstorming)를 통하여 평가항목의 상관성 분석을 실시하였다. 논의에 참여한 전문가들은 상호간의 의견을 제시 후 논의를 통해 도시계획시설 중에서도 방재회복력을 향상 또는 저감시키는데 영향력이 미미한 시설들이 존재할 것으로 판단하였다. 침수피해와 관련하여 도시의 직·간접적인 피해와 동시에 기능적인 마비, 그리고 도시방재 측면에서의 회복력과 관련성이 높다고 판단되는 기본시설을 중심으로 Table 2와 같이 세부지표를 선정하였다. 또한, 각 지표간의 상관관계를 규명하였으며 분석결과는 Table 3과 같다. 회복력 평가요인 간 상관분석 결과를 보면 교통시설은 도시 전체에 걸쳐 형성되어 있으며 각 시설들을 연결해주는 중요한 기능을 수행하기 때문에 대부분 시설의 회복력 특성과

Table 3. Correlation Analysis of Resilience for Urban Planning Facilities

		Traffic facilities				Space facilities				Distribution and Supply facilities				Public, Cultural and Athletic facilities				Disaster-prevention facilities				Health and Sanitary facilities				Environmental facilities			
		R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4	R1	R2	R3	R4
Traffic facilities	R1		○	○			○	○	○		○				○	○	○		○	○	○		○	○	○		○	○	○
	R2	○		○	○			○	○			○	○			○	○			○	○			○	○			○	○
	R3	○	○		○		○	○	○		○	○	○		○	○	○		○	○	○		○	○	○		○	○	○
	R4		○	○				○	○			○	○			○	○			○	○			○	○			○	○
Space facilities	R1						○	○							○	○	○	○											
	R2	○		○		○		○	○									○	○	○	○								
	R3	○	○	○	○	○	○		○									○	○	○	○								
	R4	○	○	○	○		○	○																					
Distribution and Supply facilities	R1										○	○						○	○	○	○								
	R2	○		○						○		○	○					○	○	○	○								
	R3	○	○	○	○					○	○		○					○	○	○	○								
	R4	○	○	○	○						○	○																	
Public, Cultural and Athletic facilities	R1														○	○		○	○	○	○								
	R2	○		○											○		○	○											
	R3	○	○	○	○										○	○		○	○	○	○								
	R4	○	○	○	○										○	○													
Disaster-prevention facilities	R1					○		○		○		○		○		○		○	○		○		○		○		○		○
	R2	○		○		○		○		○		○		○		○		○		○	○		○		○		○		○
	R3	○	○	○	○	○		○		○		○		○		○	○	○		○		○		○		○		○	○
	R4	○	○	○	○	○		○		○		○		○		○		○	○		○		○		○		○		○
Health and Sanitary facilities	R1																	○	○	○	○		○	○					
	R2	○		○																		○		○	○				
	R3	○	○	○	○													○	○	○	○	○	○		○				
	R4	○	○	○	○																		○	○					
Environmental facilities	R1																	○	○	○	○					○	○		
	R2	○		○																						○		○	○
	R3	○	○	○	○													○	○	○	○					○	○		○
	R4	○	○	○	○																						○	○	

R1: Robustness, R2: Redundancy, R3: Rapidity, R4: Resourcefulness

상관성이 있는 것으로 분석되었다. 유통 및 공급시설은 시민들의 일상생활인 Lifelines과 가장 관련이 깊은 시설들로 구성되어 있어 대부분 시설의 회복력 특성에 영향을 주는 것으로 분석되었다. 공공 및 문화체육시설은 재난 발생 시 주요한 프로세스에 의해 각종 상황 전파 이외에도 당해 시설에 의해 다른 기타시설 등의 피해를 저감시키기 위한 대처가 가능한 시설이기 때문에 대부분 시설의 회복력 특성과 상관성이 있는 것으로 분석되었다. 방재시설은 설치 유무만으로도 직접적으로 회복력과 연관성을 가지므로 대부분의 시설들은 회복력 특성에 영향을 주는 것으로 분석되었다. 공간시설, 보건위생시설, 환경기초시설의 경우에는 다른 도시계획시설들과 상관성이 전혀 없는 것은 아니지만, 각 시설들이 지니고 있는 고유 특성으로 인해 부분적으로만 상관성이 있는 것으로 나타났다.

상관분석 관계가 설계된 구조를 Super Decisions 2.8.0에 적용하면 도시계획시설의 상위요소와 하위요소에 대한 Network Syntax 모형이 도출된다. 각 시설의 회복력 평가지표의 영향력은 Fig. 2와 같이 표현된다.

Anderson (1995)과 Alder and Ziglio (1996)의 연구에 의하면 전문가 설문을 적용하기 위해 10-15명의 소집단의 전문가만으로도 유용한 결과를 얻을 수 있음을 규명하였다

(Anderson, 1995; Alder and Ziglio, 1996). 본 연구는 ANP를 활용한 중요도 분석을 위하여 도시침수 발생 시 도시계획시설의 회복력 평가요인 상관분석 결과를 바탕으로 도시계획시설의 지표별 중요도에 대한 설문 양식을 작성하여 2018년 12월 3일부터 22일까지 20일 동안 전문가 설문을 실시하였다. 설문조사의 대상은 환경분야, 도시분야, 토목분야, 건축분야, 정책분야 등의 학계, 시공, 관리 등에 종사하며 경력 10년 이상인 전문가 집단 20명을 대상으로 의도적 표집(Purposive sampling)을 통하여 전문가 설문을 실시함으로써 필요한 자료를 수집하였다. 자료 수집을 위한 방법은 직접방문과 e-mail을 병행하는 방법으로 설문조사를 실시하였다.

3. 분석 및 결과고찰

도시계획시설별 회복력 분석결과는 Table 4와 Fig. 3과 같으며, 방재시설이 0.26268의 가중치로 가장 높은 회복력을 보여주고 있으며, 그 뒤로 공간시설(0.23158) > 교통시설(0.17345) > 공공·문화체육시설(0.10694) > 환경기초시설(0.08835) > 보건위생시설(0.07241) > 유통 및 공급시설(0.06460)의 순으로 점차 회복력이 낮아지는 것으로 분석되었다. 방재시설은 직접적인 방재기능을 하고 있기 때문에

Fig. 2. Network Syntax of Resilience Analysis

Table 4. Resilience of Urban Planning Facilities

Assessment Index		Normalized by Cluster	Limiting	Weight	Priority
Traffic facilities	Robustness	0.26084	0.04524	0.17345	3
	Redundancy	0.27586	0.04785		
	Rapidity	0.22350	0.03877		
	Resourcefulness	0.23980	0.04159		
Space facilities	Robustness	0.31187	0.07222	0.23158	2
	Redundancy	0.28534	0.06608		
	Rapidity	0.29646	0.06865		
	Resourcefulness	0.10634	0.02463		
Distribution and Supply facilities	Robustness	0.21840	0.01411	0.06460	7
	Redundancy	0.23634	0.01527		
	Rapidity	0.23693	0.01531		
	Resourcefulness	0.30834	0.01992		
Public, Cultural and Athletic facilities	Robustness	0.27298	0.02919	0.10694	4
	Redundancy	0.13185	0.01410		
	Rapidity	0.27691	0.02961		
	Resourcefulness	0.31827	0.03403		
Disaster-prevention facilities	Robustness	0.24703	0.06489	0.26268	1
	Redundancy	0.21185	0.05565		
	Rapidity	0.35619	0.09357		
	Resourcefulness	0.18493	0.04858		
Health and Sanitary facilities	Robustness	0.29419	0.02130	0.07241	6
	Redundancy	0.11819	0.00856		
	Rapidity	0.30378	0.02200		
	Resourcefulness	0.28384	0.02055		
Environmental facilities	Robustness	0.36202	0.03198	0.08835	5
	Redundancy	0.28213	0.02493		
	Rapidity	0.23005	0.02032		
	Resourcefulness	0.12580	0.01111

(a) Weight of Resilience

(b) Weight of Resilience Element

Fig. 3. Resilience of Urban Planning Facilities

회복력이 가장 높게 나타난 것으로 판단되며, 공간시설의 경우에는 저류기능 및 지하침투 기능을 갖고 있어 직·간접적인 방재기능이 가능하기 때문에 회복력이 높은 것으로 나타났다.

교통시설은 재난 피해 발생 시 도시기능 마비까지도 이어질 수 있음에도 불구하고 도시의 전 지역에 걸쳐 다방면으로 구성되어 있어 내구성, 대체성 등에서 다른 시설에 비해 높은 점수를 받아 회복력이 높은 편에 속한 것으로 여겨진다. 공공·문화체육시설은 재난 발생 시 주요한 프로세스에 의해 각종 상황 전파 이외에도 당해 시설에 의해 피해에 대응하기 위한 대처가 가능하며, 피난·대피소로의 장소제공이 가능하다는 점에서도 회복력을 높일 수 있다는 가능성이 제시된 것으로 판단된다.

환경기초시설은 방재기능은 없고 2차 피해의 우려가 높다는 점에서 회복력이 굉장히 낮은 것으로 나타났다. 보건위생 시설은 공동묘지라는 간접적인 방재기능이 가능한 시설이 있음에도 불구하고 그 방재기능 또한 미약한 것으로 판단되며, 종합의료시설이 피해가 있을 경우 인적인 피해가 발생되는 상황임으로 그 회복력은 굉장히 낮은 것으로 나타났다. 유통 및 공급시설은 방재기능은 없으며, Buneau et al. (2003)에서 논의된 시민들의 일상생활인 Lifelines과 가장 관련이 깊은 시설들로서 피해가 발생하였을 경우 사소한 피해부터 생활에 큰 불편을 주는 피해뿐만 아니라 폭발의 위험까지 내포하고 있어 2차 피해의 발생 가능성도 충분히 있다. 또한 이들 Lifelines 관련 시설들은 서로 유기적으로 연결되어 있어 한 곳에서 피해가 발생한다 할지라도 피해 지역의 범위가 매우 광범위하게 나타나 도시 기능이 마비될 수 있는 특성을 지니고 있어 회복력이 가장 낮게 분석된 것으로 판단된다.

도시계획시설의 하위요소인 각 시설별 회복력 분석결과는 Tables 5-11, 그리고 Figs. 4-10과 같다.

교통시설의 회복력 분석결과 Table 5, Fig. 4와 같으며 주차장이 0.45719의 가중치로 가장 높은 회복력을 보여주고 있으며, 그 뒤로 도로(0.33004) > 철도(0.15423) > 자동차정류장(0.05853)의 순으로 점차 회복력이 낮아지는 것으로 분석되었다. 노상주차장, 노외주차장, 건축물 부설 주차장으로 분류되고 있는 주차장은 불투수면적이나 지하공간에 설치되어 있는 경우에는 침수피해를 가중시킬 우려가 있으나, 노상·노외주차장의 경우에는 지표면이 침투가 가능한 구조로 되어 있을 경우에는 오히려 간접적인 방재기능을 함으로써 회복력을 높여주는 것으로 보인다. 물자 운반을 주기능으로 하는 도로는 지역 간 또는 시설 간 연결의 기능을 수행하기 때문에 자체적인 피해로 인한 위험의 문제뿐만 아니라 2차적으로 피난, 복구, 응급구조 등의 기능을 상실하게 되어 생활에 불편을 초래하는 등 도시기능이 마비되는 상황까지 직면하게 된다. 또한 침수가 발생한 이후에도 대응 및 복구를 위해 필수적인 역할을 하게 되어 도시의 회복력을

분석하는데 있어 중요한 요소로 작용한다. 철도 역시 도로와 마찬가지로 기능을 할 것으로 예상되어지나, 철도 연장이나 사용빈도, 편리성 면에서 도로보다는 그 필요성은 다소 적은 것이 사실이다. 자동차정류장은 시설이 받는 피해 외에는 다른 피해는 없을 것으로 판단된다.

Table 5. Resilience of Traffic Facilities

Assessment Index		Normalized by Cluster	Limiting	Weight	Priority
Roads	Robustness	0.24955	0.08236	0.33004	2
	Redundancy	0.19137	0.06316		
	Rapidity	0.18607	0.06141		
	Resourcefulness	0.37302	0.12311		
Railways	Robustness	0.04729	0.00729	0.15423	3
	Redundancy	0.15530	0.02395		
	Rapidity	0.14847	0.02290		
	Resourcefulness	0.64894	0.10009		
Parking lots	Robustness	0.24655	0.11272	0.45719	1
	Redundancy	0.23912	0.10932		
	Rapidity	0.46109	0.21081		
	Resourcefulness	0.05325	0.02434		
Automobile depots	Robustness	0.16943	0.00992	0.05853	4
	Redundancy	0.26858	0.01572		
	Rapidity	0.42350	0.02479		
	Resourcefulness	0.13849	0.00811

Fig. 4. Resilience of Traffic Facilities

공간시설의 회복력 분석결과는 Table 6, Fig. 5와 같으며 공원·녹지가 0.29514의 가중치로 가장 높은 회복력을 보여 주고 있으며, 그 뒤로 광장(0.27102) > 공공공지(0.22203) > 유원지(0.21181)의 순으로 점차 회복력이 낮아지는 것으로

분석되었다. 공간시설 전체에 걸쳐서 침수로 인한 피해가 다른 도시계획시설에 비해 적은 편이며, 저류기능 및 지하침투 기능을 갖고 있어 우수유출을 억제시킬 수 있을 뿐 아니라 침수피해의 확산 방지, 피난·대피소로 이용 등의 직·간접적인 방재기능이 가능하다는 장점이 있다. 다만, 회복력의 가중치가 다르게 분석된 것은 우수의 저류기능 및 지하침투 기능과 더불어 시설들이 얼마만큼 잔존해 있는지에 대한 차이로 보여진다.

Table 6. Resilience of Space Facilities

Assessment Index		Normalized by Cluster	Limiting	Weight	Priority
Squares	Robustness	0.22158	0.06005	0.27102	2
	Redundancy	0.55241	0.14971		
	Rapidity	0.16246	0.04403		
	Resourcefulness	0.06355	0.01722		
Parks, green areas	Robustness	0.43749	0.12912	0.29514	1
	Redundancy	0.23086	0.06814		
	Rapidity	0.27497	0.08116		
	Resourcefulness	0.05668	0.01673		
Amusement parks	Robustness	0.26560	0.05626	0.21181	4
	Redundancy	0.27658	0.05858		
	Rapidity	0.37104	0.07859		
	Resourcefulness	0.08678	0.01838		
Vacant public land	Robustness	0.14696	0.03263	0.22203	3
	Redundancy	0.65592	0.14564		
	Rapidity	0.10833	0.02405		
	Resourcefulness	0.08879	0.01971

Fig. 5. Resilience of Space Facilities

유통 및 공급시설의 회복력 분석결과는 Table 7, Fig. 6과 같으며 방송·통신시설이 0.40479의 가중치로 가장 높은 회복력을 보여주고 있으며, 그 뒤로 공동구(0.19847) > 수도 공급설비(0.11837) > 가스공급설비/열공급설비(0.11697) >

전기공급설비(0.10680) > 유류저장 및 송유설비(0.05460)의 순으로 점차 회복력이 낮아지는 것으로 분석되었다. 방송·통신시설은 재해관련 피해가 발생하였을 경우 공공청사가 하는 방재 역할을 도울 수 있는 기능으로써 도시민들을 통제하고 신속하게 각종 상황 전파, 파난, 구급 등의 정보를 전달할 수 있으므로 효율적 대처가 가능해진다는 측면에서 그 중요성이 크기 때문에 회복력이 높은 것으로 보여진다. 공동구, 수도공급설비, 가스공급설비/열공급설비, 전기공급설비는 시민들의 일상생활인 Lifelines과 가장 관련이 깊은 시설들으로써 피해가 발생하였을 경우 사소한 피해부터 시작하여 생활에 큰 불편을 줄 수 있는 피해를 끼칠 수 있을 뿐 아니라 폭발의 위험까지 내포하고 있어 2차 피해가 발생할 수 있는 소지도 다분하다. 이들 Lifelines 관련 시설들은 서로 유기적으로 연결되어 있어 한 곳에서 피해가 발생한다 할지라도 피해 지역의 범위가 매우 광범위하게 나타날 수 있는 특성을 지니고 있다. 다만, 공동구나 수도공급설비의 경우에는 우수를 저류할 수 있는 가능성이 있어 다른 시설보다는 회복력이 높게 나타났으며, 전기공급설비나 가스공급설비/열공급설비는 폭발의 위험성을 내포하고 있어 회복력이 낮게 나타났다. 유류저장 및 송유설비는 환경기초시설과 마찬가지로 환경적으로 오염을 시킬 수 있는 시설로써 도시침수 피해 시 오염 물질을 확산시킬 가능성이 있어 피해지역 및 피해시설이 주변지역까지도 넓게 확산되어 2차 피해의 우려가 큰 시설로 판단되어 회복력이 매우 낮은 것으로 나타났다.

Table 7. Resilience of Distribution and Supply Facilities

Assessment Index		Normalized by Cluster	Limiting	Weight	Priority
Water supply facilities	Robustness	0.25696	0.03042	0.11837	3
	Redundancy	0.23789	0.02816		
	Rapidity	0.24583	0.02910		
	Resourcefulness	0.25932	0.03069		
Electricity supply facilities	Robustness	0.26741	0.02856	0.10680	5
	Redundancy	0.21806	0.02329		
	Rapidity	0.23299	0.02488		
	Resourcefulness	0.28154	0.03007		
Gas and heat supply facilities	Robustness	0.29948	0.03503	0.11697	4
	Redundancy	0.21288	0.02490		
	Rapidity	0.20379	0.02384		
	Resourcefulness	0.28386	0.03320		
Broadcasting and communications facilities	Robustness	0.21646	0.08762	0.40479	1
	Redundancy	0.23941	0.09691		
	Rapidity	0.24460	0.09901		
	Resourcefulness	0.29953	0.12125		
Utility tunnels	Robustness	0.29178	0.05791	0.19847	2
	Redundancy	0.24413	0.04845		
	Rapidity	0.23837	0.04731		
	Resourcefulness	0.22573	0.04480		
Oil-storage, and oil supply facilities	Robustness	0.09827	0.00537	0.05460	6
	Redundancy	0.27334	0.01493		
	Rapidity	0.27574	0.01506		
	Resourcefulness	0.35264	0.01926

(a) Weight of Resilience

(b) Weight of Resilience Element

Fig. 6. Resilience of Distribution and Supply Facilities

공공·문화체육시설의 회복력 분석결과는 Table 8, Fig. 7과 같으며 운동장이 0.39543의 가중치로 가장 높은 회복력을 보여주고 있으며, 그 뒤로 학교(0.24704) > 공공청사(0.21692) > 연구시설/사회복지시설(0.14062)의 순으로 점차 회복력이 낮아지는 것으로 분석되었다. 운동장은 공간시설과 마찬가지로 저류기능 및 지하침투 기능을 갖고 있어 우수유출을 억제시킬 수 있을 뿐 아니라 침수피해의 확산 방지, 파난·대피소로 이용 등의 간접적인 방재기능이 가능하여 회복력이 높은 것으로 나타났다. 학교는 방재기능으로 파난·대피소로 장소제공이 가능하여 방재거점시설로서의 기능을 하여 회복력이 다소 높은 것으로 나타났다. 공공청사의 경우 주요 기능은 자체적으로 도시를 운영하고 관리하는

Table 8. Resilience of Public, Cultural and Athletic Facilities

Assessment Index		Normalized by Cluster	Limiting	Weight	Priority
Schools	Robustness	0.13163	0.03252	0.24704	2
	Redundancy	0.13285	0.03282		
	Rapidity	0.32684	0.08074		
	Resourcefulness	0.40867	0.10096		
Athletic fields	Robustness	0.28282	0.11184	0.39543	1
	Redundancy	0.27516	0.10881		
	Rapidity	0.36459	0.14417		
	Resourcefulness	0.07743	0.03062		
Public buildings	Robustness	0.14104	0.03059	0.21692	3
	Redundancy	0.08397	0.01821		
	Rapidity	0.13086	0.02839		
	Resourcefulness	0.64413	0.13972		
Research facilities, social welfare facilities	Robustness	0.20943	0.02945	0.14062	4
	Redundancy	0.12849	0.01807		
	Rapidity	0.14025	0.01972		
	Resourcefulness	0.52183	0.07338

(a) Weight of Resilience

(b) Weight of Resilience Element

Fig. 7. Resilience of Public, Cultural and Athletic Facilities

역할을 하고 있으며, 도시민들에게 각종 정보를 제공하고 행정에 관한 역할을 하고 있기 때문에 침수피해가 발생하였을 경우 각종 상황 전파, 피난, 구급 등의 기능 등의 중앙통제의 기능을 담당하는 기관이 사라지게 되므로 그 중요성은 매우 크다고 할 수 있다. 따라서 방재기능적인 면에서도 중요하다 피해를 받았을 경우 핵심적인 기능이 상실되므로 회복력은 낮게 나타났다. 연구시설/사회복지시설은 방재기능은 없으며, 재난으로부터 피해를 받았을 경우 경제적으로 환산이 어려운 그동안 축적해온 자료, 연구실적 등이 손실되는 피해가 있음으로 회복력은 매우 낮은 것으로 나타났다.

방재시설의 회복력 분석결과는 Table 9, Fig. 8과 같으며 하천이 0.49929의 가중치로 가장 높은 회복력을 보여주고 있으며, 그 뒤로 우수지/저수지(0.27189) > 방재설비(0.22883)의 순으로 점차 회복력이 낮아지는 것으로 분석되었다. 하천, 우수지/저수지는 물과 관련된 시설들로써 재난의 규모만 포용할 수 있다면 직·간접적인 방재기능이 가능하므로 매우

Table 9. Resilience of Disaster-prevention Facilities

Assessment Index		Normalized by Cluster	Limiting	Weight	Priority
Rivers	Robustness	0.31946	0.15950	0.49929	1
	Redundancy	0.25561	0.12762		
	Rapidity	0.32017	0.15986		
	Resourcefulness	0.10475	0.05230		
Detention ponds, reservoirs	Robustness	0.38982	0.10599	0.27189	2
	Redundancy	0.16030	0.04358		
	Rapidity	0.39536	0.10749		
	Resourcefulness	0.05452	0.01482		
Prevention facilities	Robustness	0.22089	0.05055	0.22883	3
	Redundancy	0.19020	0.04352		
	Rapidity	0.36202	0.08284		
	Resourcefulness	0.22689	0.05192

(a) Weight of Resilience

(b) Weight of Resilience Element

Fig. 8. Resilience of Disaster-prevention Facilities

중요한 시설이라고 할 수 있다. 방재설비 역시 직접적인 방재 기능 담당할 수 있는 시설들로써 회복력 차원에서 중요성이 매우 크다고 할 수 있다.

보건위생시설의 회복력 분석결과는 Table 10, Fig. 9와 같으며 공동묘지가 0.92360의 가중치로 가장 높은 회복력을 보여주고 있으며, 종합의료시설(0.07640)은 회복력이 매우

Table 10. Resilience of Health and Sanitary Facilities

Assessment Index		Normalized by Cluster	Limiting	Weight	Priority
Cemeteries	Robustness	0.41684	0.38500	0.92360	1
	Redundancy	0.26677	0.24639		
	Rapidity	0.27613	0.25503		
	Resourcefulness	0.04026	0.03718		
General medical facilities	Robustness	0.01538	0.00118	0.07640	2
	Redundancy	0.15011	0.01147		
	Rapidity	0.09526	0.00728		
	Resourcefulness	0.73925	0.05648

(a) Weight of Resilience

(b) Weight of Resilience Element

Fig. 9. Resilience of Health and Sanitary Facilities

낮은 것으로 분석되었다. 공동묘지는 공간시설과 마찬가지로 저류기능 및 지하침투 기능을 갖고 있어 우수유출을 억제시킬 수 있는 간접적인 방재기능이 가능하여 회복력이 높은 것으로 나타났다. 종합의료시설은 재난 피해로 인해 발생된 환자를 치료하는 시설로써 인적네트워크의 요소로써 매우 중요한 임무를 띄고 있다는 특성을 갖고 있어 회복력이 매우 낮은 것으로 나타났다.

환경기초시설의 회복력 분석결과는 Table 11, Fig. 10과 같으며 하수도 0.41448의 가중치로 가장 높은 회복력을 보여주고 있으며, 그 뒤로 폐기물처리시설(0.29282) > 수질 오염방지시설(0.29270)의 순으로 점차 회복력이 낮아지는 것으로 분석되었다. 환경기초시설의 특성상 환경적으로 오염을 시킬 수 있는 시설들로 구성되어 있으며 도시침수 피해 시 오염 물질을 유출·확산시킬 가능성이 농후하여 피해지역 및 피해시설이 주변지역·시설까지도 넓게 확산되어 2차 피해의 우려가 큰 시설이다. 다만, 하수도의 경우에

는 우수를 저류할 수 있는 가능성이 내포되어 있어 다른 환경기초시설에 비해 회복력이 높은 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 기후변화에 대한 문제 중에서도 가장 피해가 큰 침수피해를 예방하기 위한 접근방법으로 도시계획시설의 회복력을 평가하여 도시공간적으로 침수피해를 최소화 할 목적으로 방재회복력을 분석하였다. 회복력은 내구성, 대체성, 자원 동원력, 신속성 등의 4가지 기능적인 목표를 갖고 있으며, 도시계획시설은 침수피해로부터 피해를 받는 시설, 방재기능이 가능한 시설, 2차 피해를 발생시키는 시설 등의 특성으로 구분되어 있다. 본 연구에서는 각 특성별 상대적 가치 평가를 위해 ANP 분석을 실시하였다.

도시계획시설의 방재회복력 분석 결과, 방재시설이 0.26268의 가중치로 가장 높은 회복력을 보여주고 있으며, 다음으로 공간시설(0.23158) > 교통시설(0.17345) > 공공·문화체육시설(0.10694) > 환경기초시설(0.08835) > 보건위생시설(0.07241) > 유통 및 공급시설(0.06460)의 순으로 점차 회복력이 낮아지는 것으로 분석되었다. 방재시설의 경우 방재기능의 특성이 있으며, 공간시설은 저류 기능, 교통시설은 도시기능을 연결해 주는 기능, 공공·문화체육시설은 피난 대피소로서의 기능, 환경기초시설은 2차 피해의 가능성, 보건위생시설은 인적피해의 가능성, 유통 및 공급시설은 일상생활과 밀접성 등과 관련한 특성으로 인해 방재회복력이 분석되었다.

전체적인 결과를 종합해 볼 때, 도시계획시설은 고유한 특성에 따라 방재회복력이 미치는 영향이 높은 것으로 사료된다. 따라서 도시공간적 계획인 토지이용계획 수립 시, 침수피해로부터 위험한 지역에 회복력이 높은 도시계획시설을 계획하고, 반대로 안전한 지역에는 회복력이 낮은 도시계획시설을 계획함으로써 침수피해를 최소화 할 수 있을 것으로 기대한다.

비구조적 대책에 속하는 도시공간적인 대책을 통해 각 도시계획시설의 방재회복력을 고려하여 토지이용계획을 수립한다면 장기적으로도 도시침수 예방에 유용할 것으로 판단된다.

감사의 글

This paper was financially supported by Ministry of the Interior and Safety as “Human resource development Project in Disaster management.”

References

Adler, M., and Ziglio, E. (1996). *Gazing into the oracle: The Delphi method and its application to social*

Table 11. Resilience of Environmental Facilities

Assessment Index		Normalized by Cluster	Limiting	Weight	Priority
Sewage systems	Robustness	0.40555	0.16809	0.41448	1
	Redundancy	0.38255	0.15856		
	Rapidity	0.12291	0.05094		
	Resourcefulness	0.08900	0.03689		
Waste treatment facilities	Robustness	0.06831	0.02000	0.29282	2
	Redundancy	0.45471	0.13315		
	Rapidity	0.25814	0.07559		
	Resourcefulness	0.21884	0.06408		
Prevention facilities for water pollution	Robustness	0.07375	0.02159	0.29270	3
	Redundancy	0.44907	0.13144		
	Rapidity	0.21245	0.06218		
	Resourcefulness	0.26473	0.07749

(a) Weight of Resilience

(b) Weight of Resilience Element

Fig. 10. Resilience of Environmental Facilities

- policy and public health. London: Jessica Kingsley Publishers.
- Ahn, T.J. (2010). Paradigm shift of urban disaster prevention by change of disaster circumstances. *Disaster Prevention Research*, Vol. 12, No. 4, pp. 5-14.
- Anderson, D. (1995). *Strands of system: The philosophy of Charles Peirce*. West Lafayette: Purdue Univ. Press.
- Arnold, J. (1992). Useful Creative Techniques. In S. J. Parnes (Ed.), *Source Book for Creative Problem-solving* (pp. 15-30). Buffalo, New York: Creative Education Foundation Press.
- Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., et al. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthq. Spectra*, Vol. 19, No. 4, pp. 733-752.
- Godschalk, D.R. (2003). Urban hazard mitigation: Creating resilient cities. *Nat. Hazards Rev.*, Vol. 4, No. 3, pp. 136-143.
- IPCC. (2007). *Climate change 2007: Impact, adaptation and vulnerability, fourth assessment report*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Kaji, H. (2011). *Urban disaster prevention*.
- Lee, B., Kim, H., and Kim, S. (2018). Changes in climate change flood vulnerability for national territories. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 6, pp. 27-33.
- Liverman, D.M. (1990). Vulnerability to global environmental change. In R. E. Kaspersen et al. (Eds.), *Understanding global environmental change: The contributions of risk analysis and management* (pp. 27-44). Worcester, MA: The Earth Transformed Programme, Clark University.
- McDaniels, T., Chang, S., Cole, D., Mikawoz, J., and Longstaff, H. (2008). Fostering resilience to extreme events within infrastructure systems: Characterizing decision contexts for mitigation and adaptation. *Global Environmental Change*, Vol. 18, pp. 310-318.
- National Disaster Management Research Institute (NDMI). (2010). *Disaster site investigation and disaster prevention planning standard establishment for urban space and facilities*. Primary Research Report No. NIDP-주요-2010-08-03.
- Osborn, A. (1953). *Applied imagination*. New York: Charles Scribner's Sons.
- Park, K.Y., and Lee, M.H. (2018). Vulnerability analysis of urban district on the urban flood damage: A case study—Changwon. *Desal. Water Treat.*, Vol. 119, pp. 27-35.
- Saaty, T.L. (1996). *Decision making with dependence and feedback: The analytic network process*. Pittsburgh, PA: RWS Publications.
- Saaty, T.L. (2005). *Theory and applications of the analytic network process: Decision making with benefits, opportunities, costs, and risks*. Pittsburgh, PA: RWS Publications.
- Shin, S.Y. (2014). Improvement of urban planning for natural disaster reduction. *Real Estate Focus*, Vol. 75, pp. 4-15.
- Shin, S.Y., and Kim, H.R. (2011). *Analyzing relationships between land use characteristics and flood damage areas*. Report No. 2011-WP-23, Seoul Development Institute.
- Shin, S.Y., Park, C., and Son, E.J. (2015). Analyzing the effects and costs of flood protection measures for buildings. *Journal of Korea Planning Association*, Vol. 50, No. 2, pp. 243-260.
- Tierney, K., and Bruneau, M. (2007). Conceptualizing and measuring resilience: A key to disaster loss reduction. *Transportation Research News* 250, pp. 14-17.
- Zimmerman, R. (2001). Social implications of infrastructure network interactions. *J. Urban Technol.*, Vol. 8, No. 3, pp. 97-119.

Received	February 12, 2019
Revised	February 19, 2019
Accepted	April 9, 2019