

# 서울시 폭우 회복력 지수의 공간분포 분석\*

Spatial Distribution Analysis of Climate Resilience Index in Heavy Rainfall:  
The Case of Seoul

백영선 Baik, Yeong-Seon\*\*, 김관수 Kim, Kwansoo\*\*\*, 안동환 An, Donghwan\*\*\*\*

## Abstract

This study assessed Seoul's 1km×1km grid-based climate resilience following a recent heavy rainfall disaster, utilizing hotspot analysis to examine spatial resilience characteristics. The comprehensive climate resilience concept considered vulnerability, adaptation, and mitigation. Data from various sources, including the National Geographic Information Institute, Public Data Portal, and Korea Statistics, incorporated factors like population, land, infrastructure, and economy. The grid-based resilience index, ranging from 0 to 100, revealed high and low-value clusters within Seoul. Notably, clusters coexisted and repeated across administrative districts, departing from previous studies relying on such boundaries. The detailed spatial analysis surpassed district-level evaluations. A three-dimensional graph for 2018–2020 incorporated heavy rainfall resilience, damage, and frequency at the 1km × 1km grid unit level. The comprehensive interpretation considered resilience, damage scale, and disaster frequency, presenting implications for analysis and policy.

**Keywords:** Climate Resilience, Grid, Entropy Weighting, Spatial Analysis, Heavy Rainfall

## I. 서론

### 1. 연구 배경 및 목적

2022년 서울시를 비롯한 수도권 지역에서는 지역적으로 강한 폭우가 발생하면서 다수의 주택과 건물, 사업장이 침수되었고 재난 복구에도 상당한 시간과 비용이 소요되었다. 주목할 점은 이전의 재해 양상과

비교하였을 때, 단순히 폭우의 빈도와 규모가 커진 것뿐만 아니라 국소적인 지역 단위에 강한 비가 쏟아지는 지역적 성격의 폭우가 빈번해진 점이다. 국소 지역 단위에 내리는 강한 폭우는 특히 도시 지역에 심각한 피해를 유발한다. 2014년에는 서울시 마포구 홍대입구역 지하상가가 침수되었고 2017년에는 홍수가 발생하여 서울 은평구, 강서구, 서대문구의 저지대 도로 및 주택이 침수되는 피해가 발생하였다(김현준,

\* 본 논문은 2022년 환경부의 연구비 지원을 받아 수행된 "도시공간 기후탄력성 확보 기술 평가 및 의사결정지원 시스템 개발" 과제를 바탕으로 연구되었으며, 백영선(2023)의 서울대학교 석사학위논문 일부를 수정 보완하여 작성하였음.

\*\* 텍사스에이앤엠대학 박사과정(제1저자) | Ph.D. Student, Dept. of Agricultural Economics, Texas A&M Univ. | Primary Author | bys98@tamu.edu

\*\*\* 서울대학교 농경제사회학부 교수, 농업생명과학연구원 겸무연구원 | Prof., Dept. of Agricultural Economics and Rural Development, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National Univ. | kimk@snu.ac.kr

\*\*\*\* 서울대학교 농경제사회학부 교수, 농업생명과학연구원 겸무연구원(교신저자) | Prof., Dept. of Agricultural Economics and Rural Dept., Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National Univ. | Corresponding Author | dha@snu.ac.kr

황환국, 이동섭, 김영택 외 2018). 이처럼 도심지를 비롯하여 인적·물적 자원의 집중 지역에서 빈번하게 발생하는 침수 피해를 방지하기 위해서 정부는 폭우 피해 방지 사업을 매년 시행하고 있으며, 기후 및 재난 분야의 연구자들로 하여금 지역에 지닌 폭우 재해에 대한 저항 능력을 진단하고 폭우에 대한 회복력을 강화하는 방안을 모색하도록 한다. 이처럼 기후변화로 인한 폭우의 발생 양상이 국지적·지역적이고 피해가 지속되는 상황에서 폭우 회복력에 관한 연구의 중요성은 높아지고 있다.

본 논문의 목적은 인구와 각종 인프라, 자원 등이 밀집한 서울시를 대상으로 폭우 회복력 지수를 산출하고 폭우 회복력의 공간적 패턴을 파악하는 것이다. 분석의 공간적 단위를 시군구 또는 읍면동 단위가 아닌 격자로 설정함으로써 국지적으로 내리는 최근 폭우 양상의 특성을 분석에 반영하고자 한다. 구체적으로는 먼저 서울시 내 710개 격자의 폭우 회복력 지수와 실제 서울시에서 집계된 폭우 피해의 규모 및 빈도를 격자 단위에서 고려하여 국소 지역별 폭우 회복력 수준을 진단하고자 한다. 또한 서로 다른 폭우 회복력 수준을 나타내는 710개의 격자 공간이 서울시라는 지역 내에서 어떠한 공간적 상관성과 패턴을 지니고 있는지 파악하기 위하여 폭우 회복력 지수에 대한 핫스팟 분석을 수행하였으며, 이를 통해 폭우 회복력 수준이 비교적 높은 격자 군집과 폭우 회복력 수준이 비교적 낮은 격자 군집을 식별한다. 마지막으로 2018~2020년 3개년의 폭우 회복력 지수, 폭우 피해액, 폭우 기간 자료를 통해 격자 단위 폭우 회복력 지수의 공간 분석이 지방정부의 폭우 대응 정책에 주는 시사점을 도출한다.

연구에서는 1km×1km 격자 단위를 분석 단위로 설정하여 균일한 크기와 형태를 가진 각 지역이 폭우 회복력 측면에서 어떤 차이를 보이는지 명확히 파악하고자 하였다. 본 논문에서 다루는 기후변동 및 이에

대응하는 사회경제적 요인에 대한 분석에서는 미시적 수준의 접근이 필수적이다(Nhemachena and Hassan 2007). 이러한 이유로 연구자들은 국가나 시군구 단위보다는 격자, hexagon을 활용하여 세밀한 단위에서 기후회복력을 분석하는 사례가 다수 존재한다(Anderson, Clark and Sheldon 2014; Thorne, Wayburn and Urban 2020). 특히 격자는 행정구역 기반 데이터와 비교하여 차별점을 지니는데 김성희(2020)에 따르면, 격자 기반 데이터를 활용한 실증 분석은 미시적 공간집적 현상을 행정구역 단위보다 더욱 세밀하고 정확하게 분석할 수 있다는 장점이 있다. 또한 기존 공간통계에서 주로 사용되는 행정구역과 비교할 때 격자는 모양과 크기가 일정하며, 지도 스케일의 변화에 유연하게 대응할 수 있다. 최근에는 행정경계에 기반한 공간 단위가 아닌 격자 수준의 미시적 공간 단위가 도시계획이나 재난 대응 정책의 자료수집 및 분석에 활용되고 있어 격자라는 공간 단위는 국소적인 지역 단위의 기후회복력을 진단, 평가, 관리하는 데 유용하며, 재난 관리와 대응에 있어서 구체적이고 효과적인 정책 수립을 용이하게 한다는 장점이 있다.

## 2. 선행연구 검토

기후회복력(Climatic Resilience)과 관련된 이전 연구들의 논의는 기후변화와 관련하여 '회복력'을 어떠한 개념으로 정의 내릴지에 대한 것으로부터 출발한다. 김동현, 송슬기, 이현영, 강상준 외(2015)에 따르면 회복력은 물리학에서 처음 등장한 개념으로 재난이나 재해 등 외부의 충격이 주어졌을 때 물질의 안전성과 저항 능력을 기술하는 데 사용되었으나, 최근에는 공학, 심리학, 생태학 등 다양한 학문 분야로 개념의 적용이 확대되었다. 재난 발생에 따른 회복력은 재난의 발생으로 인한 피해를 흡수하고 복구할 수 있

는 역량으로 정의할 수 있는데(Timmermann 1981), 더 일반적인 관점에서 회복력은 외부의 충격이 발생했을 때 원상태로 되돌아오거나 충격에 저항할 수 있는 능력으로 해석할 수 있다. 다만 회복력을 고려하는 공간적 영역과 회복의 대상, 범위 등에 따라 회복력을 해석하는 관점의 차이가 존재한다. 학계에서는 회복력을 크게 공학 기술적 회복력(Engineering Resilience)과 생태학적 회복력(Ecological Resilience)으로 구분하는데, 전자는 시스템이나 조직이 외부 충격 발생 이전의 원상태로 돌아갈 수 있는 속도를 중요시하며 회복의 효율성에 초점을 둔다. 반면 생태학적 회복력은 비록 회복의 효율성을 극대화하지는 못하더라도 큰 충격이나 교란에 대해 기존의 기능이 지속될 수 있는 유동적 체계와 과정에 초점을 둔다(이동성, 문태훈 2019; 서세교, 장새움, 정주철 2022). 따라서 회복의 과정에서 시스템은 재조직될 수 있고, 이는 기존 시스템의 구조와 기능, 정체성에 어느 정도의 변화를 수반하는 새로운 형태의 시스템이다(Zevenbergen, Gersonius and Radhakrishan 2020). 즉, 시스템이 충격을 완전히 흡수할 수 없는 경우, 충격 발생 이전의 균형 상태로 돌아가는 대신, 그보다 덜 양호한 상태인 대안적 균형으로 전환하는 능력을 의미한다.

또한 회복력은 일반적으로 취약성, 적응 능력, 기후 노출 등의 개념과 밀접하게 연관된다. Cutter, Burton and Emrich(2010)에 따르면, 재해 회복력의 개념은 취약성과 적응 능력 등 다양한 요소를 포함하거나 이들과 함께 논의되며, 이에 대한 명확한 정의는 아직 합의되지 않은 상태이다. 또한 회복력은 특정 외부 충격을 내재화한 결과로 보기보다는 다양한 개입을 통해 강화될 수 있는 일련의 역량으로 자주 이해된다. 이러한 회복력은 단일한 개념이 아닌, 사회적, 경제적, 제도적, 인프라적, 생태적, 공동체적 요소들이 복합적으로 결합된 다차원적 개념으로 해석될 수 있다. 기존 연구들에서도 재해에 대한 취약성, 회복력, 적응

능력의 개념에 대해 명확한 합의가 이루어지지 않았으며, 재해 프레임워크에 관한 선행연구에서는 회복력을 비롯한 취약성, 적응 능력, 기후노출 등의 개념 간 관계를 다양한 방식으로 정의한다. 예를 들어, IPCC(2001)는 취약성을 시스템이 노출되는 기후 변동의 특성, 규모, 속도, 민감성, 그리고 적응 능력의 함수로 정의하며, 외부 충격을 취약성 개념에 포함시킨다. 이러한 접근은 기후변화에 대한 취약성을 시스템 내부요인과 기후요인의 상호작용으로 설명하며, 기후노출을 취약성의 한 구성요소로 본다. 반면, 본 논문에서는 회복력을 정의할 때 폭우 피해나 기후노출과 같은 외부 충격을 회복력 개념에 포함하지 않았다. 대신 폭우로 인한 피해액을 외부 충격으로 간주하고, 이를 격자 단위로 세밀하게 분석하여 평가하였다. 이러한 접근은 외부 충격과 회복력 사이의 상호작용을 더 명확히 구분하고 각각의 영향을 독립적으로 평가할 수 있게 함으로써 보다 정밀한 위험 평가와 효과적인 대응 전략 수립이 가능하게 한다. 한편 김청일(2021)이 연구한 바에 따르면, 폭우 피해로부터의 회복력은 지역사회를 구성하는 재정적, 인적, 자연적, 물리적, 사회적 자본이 미래 폭우 위험과 피해를 최소화하는 능력으로 정의되며, 폭우 회복력이 클수록 피해의 영향력은 작아진다. 해외 선행연구들에서는 폭우 회복력에 대한 논의가 폭우를 완전히 피하려 하기 보다는 그로 인한 재난적 결과를 완화해야 한다는 개념에 기반하거나, 폭우 위기 상황에서 견디고, 회복하며, 재조직할 수 있는 능력을 의미하는 경우가 다수 존재한다. 따라서 자연적, 기후적 요소 자체에 집중하기보다는 이에 대응할 수 있는 경제, 사회, 물리, 행정, 인구적 요소, 즉 도시적 요소에 집중하여 폭우 회복력을 구축하려는 시도가 많다(Zevenbergen, Gersonius and Radhakrishan 2020; McClymont, Morrison, Beevers and Carmen 2020).

앞선 논의를 종합하면, 기후회복력은 폭염, 폭우,

이상고온 등 기후변화에 따른 해수면 상승 혹은 기상 이변으로 발생할 수 있는 재난에 대비하여 그 이전의 상태로 되돌아갈 수 있는 능력으로 정의할 수 있다. 기후충격에 대한 회복력은 인간을 비롯한 생물이나 물리적 시스템이 반응하는 정도뿐만 아니라 인프라, 경제 등을 포함한 사회 전반의 시스템이 충격에 대응하는 적응 능력을 모두 포괄하는 개념이다. 이러한 경우 회복력은 공학 기술적 회복력이 아닌 생태학적 회복력 관점에 더 부합한다. 본 논문은 특히 폭우에 따른 회복력 수준을 진단하고자 하였으며 이에 따라 본 논문에서 다루는 폭우 회복력이란 폭우로부터 대비하고 재해 이전의 상태로 돌아갈 수 있는 능력으로서 '폭우 회복력'에 관한 것으로 정의하였다.

회복력 개념을 사용한 선행연구 중 회복탄력성의 주요 영향을 분석한 연구로는 박하나, 송재민(2015)의 연구가 있다. 이 연구는 기후변화에 대한 회복력을 정량적으로 분석한 예시로, 회복탄력성 비용지수를 계산하여 서울시의 풍수해에 대한 회복탄력성의 주요 영향요인을 조사하였다. 손민우, 성진영, 정은성, 전경수(2011)는 기후변화를 고려하여 홍수 취약성 지표를 개발하고 이를 북한강 유역의 여섯 중권역에 적용하는 연구를 수행하였으며, 서세교, 장새움, 정주철(2022)은 국내 17개 시·도를 대상으로 침수 피해에 따른 재해 회복력 지수를 계산하였다.

이처럼 폭우 회복력을 정량화한 선행연구들은 지자체, 하천 유역, 행정구역 등을 공간적 분석 단위로 설정하는 경우가 많았으며 1km 격자와 같이 미시적인 단위에서 기후회복력을 분석한 사례는 발견되지 않았다. 해외에서는 Price, Hudson, Boyce and Schellekens et al.(2012)이 영국과 웨일스 지역의 홍수 예측을 위해 격자 기반의 모델을 개발하였으며, 일본 국토교통성은 2012년에 고해상도 격자 단위의 관측 자료를 기반으로 인구, 침수구역 내 자산 가치 등을 격자 통계 자료로 계산하는 지침을 배포하였다

(MLIT 2012). 이처럼 해외에서는 격자 기반의 통계 자료가 국내에 비해 더욱 정교하게 구축되어 있으며 이를 홍수 예측이나 폭우 피해액 계산 등에 적극적으로 활용하여 미시적인 단위의 분석을 수행하고 정책 사업을 추진하는 모습이 나타났다.

본 논문에서는 서울시 지역 1km×1km 격자 710개를 대상으로 폭우 회복력 지수를 산출하고 공간 분석을 수행하여 연구의 시사점을 도출하고자 한다. 제2장에서는 분석 자료에 대한 설명과 함께 서울시 710개 격자에 대하여 폭우 회복력 지수를 산출하는 방법 및 공간 분석의 방법을 기술하였다. 제3장에서는 연구의 결과를 격자 단위 폭우 회복력 지수 산출 결과, 폭우 회복력 지수 기반 공간 분석 결과, 회복력 지수-피해 규모-피해 빈도 간 관계에 기반한 결과 해석으로 나누어 설명하며, 마지막으로 제4장에서는 요약 및 결론, 연구의 한계를 서술하였다.

## II. 분석 자료 및 분석 방법

### 1. 분석 자료

본 연구에서는 폭우를 포함한 기후회복력 및 취약성에 관한 선행연구로서, 김동현, 송슬기, 이현영, 강상준 외(2015), 김동현, 송슬기, 강상준, 권태정 외(2016), 강유진, 왕원준, 이하늘, 김경탁 외(2021), 서세교, 장새움, 정주철(2022), 손민우, 성진영, 정은성, 전경수(2011), 유가영, 김인애(2008)의 연구를 참고하여 폭우와 관련된 세부 지표를 선별하였고 이를 기반으로 폭우 회복력 지수를 산출하고자 한다. 세부 지표들은 먼저 관찰 가능성, 정량적 데이터로의 측정 가능성, 구체성, 그리고 이용 가능성을 기준으로 선정되었다. 이를 바탕으로 각 부처와 공개된 통계 자료를 조사하여, 지방정부의 재난 예방 및 완화 능력을 평가할 수 있는 잠재적인 지표 후보들을 정리하였다. 이후

지표별 가중치를 산출하여 변수의 중요도를 설명하기에 앞서 상관분석을 수행하여 변수 간의 선형 관계가 존재하는지 검토하였다. 상관분석에서는 공분산(Covariance)이 핵심적으로 다루어지며, 이는 두 확률 변수 사이의 '상관성, 의존성, 유사성'의 방향과 크기를 나타내는 척도이다. 상관계수는 -1에서 1 사이의 값을 가지며, 이 값이 양 끝점에 가까울수록 변수 간의 상관관계가 높음을 의미하므로, 높은 상관관계를 가진 변수는 제거할 필요가 있을 수 있다.

예를 들어, 공공행정 부문의 후보 지표 중 소방서와 재해관리기금의 상관계수가 0.8 이상으로 나타나 두 변수 간의 상관성이 매우 높은 것으로 분석되었다. 이러한 높은 상관성은 두 변수가 유사한 정보를 제공한다는 것을 의미하며, 중복성을 피하고 보다 정확한 분석을 위해 소방서를 지표로 최종 선정하였다. 소방서가 재난 예방과 대응의 물리적 실체로서 중요한 역할을 수행하며, 구체적이고 신뢰할 수 있는 데이터를 제공할 수 있기 때문이다. 특히, 소방서는 폭우와 같은

표 1 폭우 회복력 지수 산출을 위한 세부 지표

구분	변수	V/C	변수설명	단위
경제 (Economic)	GRDP(천 원)	C	(자치구별 GRDP) × (해당 자치구 내 격자별 총사자 수)	격자
	재정자립도(%)	C	지방 재정의 건전성을 나타내는 지표로 (지방세+세외수입) ÷ (자치단체예산 규모) × 100	자치구
	1인당 지방세액(천 원)	C	지방세액 ÷ 주민등록 인구수	자치구
사회 (Social)	응급의료시설 접근성(km)	C	격자(1km×1km) 중심점으로부터 가장 가까운 응급의료시설까지 도로 이동거리	격자
	응급실(점수)	C	서울시 내 응급실 공간정보	
	보건소(점수)	C	서울시 내 보건소 공간정보	
	노인여가복지시설 접근성(km)	C	격자(1km×1km) 중심점으로부터 가장 가까운 노인 여가복지시설까지 도로 이동거리	
물리 (Physical)	주요 공원(점수)	V	서울시 내 주요 공원 위치	
	녹지대(점수)	V	서울시 내 녹지대 공간정보	
	방재시설	C	서울시 방재시설 현황정보	
	노후 건축물 수(개)	V	원천자료 국토교통부 제공	
	옥상녹화(점수)	C	서울시 옥상녹화사업 공간정보	
	지하층 수(층)	V	원천자료 국토교통부 제공	
공공·행정 (Governance)	토지이용 압축도(%)	V	격자 내 토지이용(건물)의 밀도 ((격자 내 건축물 연 면적 합 ÷ 격자면적(1km <sup>2</sup> )) × 100%)	자치구
	사회복지예산 비중(%)	C	자치구별 일반회계 중 사회복지예산 비중	
인구 (Population)	소방서(개)	C	119종합방재전산정보시스템의 소방서 관할 공간정보	격자
	주거용도 면적(m <sup>2</sup> )	V	원천자료 국토교통부 제공	
	인구밀도(명/km <sup>2</sup> )	V	원천자료 행정안전부 제공	
	고령 인구수(명)	V		
	유소년 인구수(명)	V		
유아 인구수(명)	V			

주: V는 취약성(Vulnerability), C는 적응 능력(Adaptive Capacity)을 의미함.

자료: 국토지리정보원(<https://www.ngii.go.kr/kor/main.do>, 2022년 12월 10일 검색), 공공데이터포털(<https://www.data.go.kr>, 2022년 8월 10일 검색), 통계청 국가통계포털(<https://kosis.kr>, 2022년 6월 20일 검색).

재난 발생 시 가장 신속하게 대응하는 기관 중 하나로, 이러한 상황에서의 대응력은 지역사회의 재난 예방 및 완화 능력을 평가하는 데 핵심적인 지표로 활용될 수 있다. 이처럼 지표 간 상관관계를 고려하여 중복을 피하고, 각 영역을 대표할 수 있는 수집 가능한 지표들을 선정하였다(표 1) 참조). 이러한 접근은 지표의 독립성을 유지하면서 지역사회의 재난 관리 역량을 보다 정확하고 신뢰성 있게 평가하여 연구의 타당성을 높이고 폭우 회복력 지수를 도출하는 데 중요한 기초를 제공한다.

또한 본 논문에서 선정된 지표들은 도시의 기능적 측면에서 4R이라는 회복력 개념과 연계될 수 있다. Bruneau, Chang, Eguchi and Lee et al.(2003)에 따르면, 회복력은 4가지 영역인 내구성(Robustness), 가외성(Redundancy), 자원부존성(Resourcefulness), 신속성(Rapidity)으로 구분된다. 내구성은 시스템 또는 지역이 외부의 충격이나 재난을 흡수하고 견딜 수 있는 역량을 의미하며, 가외성은 외부 충격으로 일부 시스템이 작동하지 않을 때 이를 대체할 수 있는 역량을 의미한다. 자원부존성은 충격으로부터의 피해 복구를 위한 자원을 가용할 수 있는 역량을, 신속성은 신속한 복구를 통해 장기적인 피해를 방지할 수 있는 역량을 의미한다. 본 논문에서 활용한 경제적 측면의 지표들은 도시나 지역의 시스템이 기능을 잃었을 때 이를 대체할 수 있는 역량을 제공하므로 가외성과 연계된다. 사회적 측면의 지표들은 자원의 동원력과 장기적 피해를 방지하는 장치로 기능하기 때문에 가외성 및 신속성과 연계될 수 있다. 물리적 측면에서는 재해 재난 기반 시설이나 건물 등이 자원 동원 역량을 의미하며, 동시에 재난을 견딜 수 있는 능력과 연계되므로 자원부존성 및 내구성과 연계된다. 또한, 거버넌스는 재난 발생 시 신속한 복구를 지원하는 체계로서

신속성과 연계될 수 있다. 마지막으로, 인구의 소득, 교육 수준, 밀집 정도 등은 도시가 충격이나 재난을 흡수하고 견딜 수 있는 역량과 연관되어 내구성과 연계되는 지표들이다.

먼저 격자 단위 데이터는 국토지리정보원에서 제공하는 서울 지역의 격자 단위 인구수(총인구, 유아인구, 유소년 인구, 고령인구), 가장 가까운 안전 및 생활·복지 인프라까지의 거리(응급의료시설, 소방서, 노인여가복지시설), 건물 개수 및 면적(주거용도 면적, 지하층 수, 20년 이상 노후건물 수) 자료를 활용하였다. 한편 공공시설과 같은 위치 기반 자료와 지역내 총생산(이하 GRDP), 행정예산 자료 등은 비격자 형태로 제공되는 데이터로서 별도의 격자화 과정이 필요하다. 서울시 응급실, 보건소, 주요 공원, 녹지대, 옥상녹화, 사회복지시설, 서울시 도시계획시설(방재시설)<sup>1)</sup>의 위치정보 데이터의 경우 공공데이터포털에서 자료를 수집하고, 포인트 좌표로 변환한 후 해당 위치로부터 거리가 멀어질수록 낮은 값을 부여하는 방식으로 격자 공간에 나타내었다. 또한, 격자별 GRDP는 각 격자의 종사자 수를 이용하여 자치구의 GRDP로부터 추정하였다. 이 외에 1인당 지방세액, 재정자립도, 사회복지예산 비중 등 행정예산과 관련된 지표들은 집행 단위가 지방정부이므로 별도의 격자화 과정을 거치지 않았다. 즉, 행정 관련 세부 지표들은 동일 자치구 내에서 1km×1km 격자 간 데이터 값의 차이가 없으므로, 통계청에서 제공하는 서울시 자치구별 데이터값을 각 격자가 동일하게 가진다.

기후 또는 폭우 회복력을 분석한 선행연구들은 물리적 인프라, 생태계, 사회적 에이전트, 제도적 요인과 같은 다양한 지표들을 사용하여 회복력을 평가한다(Tyler, Nugraha, Nguyen and Van Nguyen et al. 2016). 이러한 지표들은 도시와 지역의 회복력을

1) 방재시설은 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 의한 것으로서 하천, 방풍설비, 방화설비, 사방설비, 방조설비 등이 포함됨.

측정하는 데 필수적인 요소로 작용하며, 본 논문에서도 이와 같은 지표들을 기반으로 분석을 진행하였다. 특히, 본 논문에서는 회복력의 내구성(Robustness), 가외성(Redundancy), 자원부존성(Resourcefulness), 신속성(Rapidity)이라는 4R 개념을 적용하여 경제, 사회, 물리, 공공·행정, 인구 분야로 구분된 지표들을 분석하였다. 경제 영역 지표는 GRDP, 재정자립도, 1인당 지방세액이고, 사회 영역 지표는 응급의료시설 접근성, 응급실, 보건소, 노인여가복지시설 접근성 지표이다. 물리 영역 지표는 주요 공원, 녹지대, 방재시설, 노후 건축물 수, 옥상녹화, 지하층 수, 토지이용 압축도이고, 공공·행정 영역 지표는 사회복지예산 비중, 소방서이고 인구 영역 지표는 주거용도 면적, 인구밀도, 고령인구, 유소년 인구, 유아 인구수이다. 분석 자료의 기초통계량은 <표 2>와 같다.

## 2. 분석 방법

### 1) 폭우 회복력 지수 산출

본 논문에서 확립한 기후회복력 개념을 기반으로 21개의 세부 지표를 회복력의 결정요인인 취약성과 적응 능력으로 구분하였다. 또한 각 세부 지표들이 폭우에 대해 지니는 영향의 방향성을 확인하기 위해 폭우 피해를 나타낼 수 있는 양적 변수로서 폭우 피해액을 분석에 활용하였다. 폭우 피해액을 양적 변수로 사용한 이유는 이 지표가 공공 및 사유 시설, 건물 피해액, 농경지, 선박 피해액 등을 포괄하여 실질적인 피해 정도를 명확하게 보여줄 수 있기 때문이다. 21개 세부 지표가 폭우 피해액과 어떤 상관성을 가지는지를 피어슨 상관관계 분석을 통해 확인하였다.

표 2 기초통계량

구분	지표	최소	최대	평균	표준편차
경제	GRDP(억 원)	0	317,490	518	22,142
	재정자립도(%)	15.8	54.70	28.79	12.89
	1인당 지방세액(천 원)	0.242	131.871	22.192	25.751
사회	응급의료시설 접근성(km)	0.0	74.22	11.54	8.15
	응급실 수(점수)	0.0	3.00	2.25	1.19
	보건소(점수)	0.0	3.00	0.78	1.13
	노인여가복지시설 접근성(km)	0.0	75.47	9.02	6.73
물리	주요 공원(점수)	0.0	3.00	2.19	1.15
	녹지대(점수)	0.0	1.00	0.63	0.48
	방재시설	0.0	3.00	2.39	1.07
	노후 건축물 수(개)	0.0	4,102.00	571.60	694.55
	옥상녹화(점수)	0.0	1.00	0.33	0.47
	지하층 수(층)	0.0	3.17	0.96	0.51
공공·행정	토지이용 압축도(%)	0.0	1,560.55	322.38	305.04
	사회복지예산 비중(%)	36.0	63.90	48.94	6.66
	소방서(개)	0.0	62.52	7.71	5.71
인구	주거용도 면적(m <sup>2</sup> )	0.0	45,859.00	13,627.31	12,804.91
	인구밀도(명/km <sup>2</sup> )	0.0	1118.78	147.69	112.46
	고령 인구수(명)	0.0	8493.00	2386.65	2302.85
	유소년 인구수(명)	0.0	6212.00	1290.81	1310.33
	유아 인구수(명)	0.0	3075.00	565.65	572.09

이후 각 세부 지표의 값들을 정규화하여 동일한 척도로 조정한 후, 엔트로피 기법을 적용하여 각 세부 지표의 정보량을 계산하고 상대적 중요도를 나타내는 가중치를 산출하였다. 엔트로피 기법은 다양한 지표 간의 상대적 중요도를 평가하는 데 사용되며, 지표 간의 분산과 정보량을 고려하여 가중치를 결정하는 방법이다. 엔트로피 기법을 적용하면 중요도가 높은 지표는 낮은 엔트로피 값을 가지게 되는데, 이는 해당 지표가 폭우 회복력에 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다. 엔트로피 방법은 가중치를 결정할 때 가장 널리 사용되는 객관적인 방법 중 하나이며, 특히 다양한 자연재해를 분석하고 예측하는 데 매우 큰 역할을 한다(Ziarh, Asaduzzaman, Dewan and Nashwan et al. 2021). 가중치 산출을 위한 세부 절차는 아래와 같다. 먼저 서울시 내 710개 격자별로 수집한 폭우 회복력 관련 세부 지표 21개 자료를 행렬(D)로 구성한다.

$$D = \begin{pmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m,1} & \cdots & x_{m,n} \end{pmatrix}$$

$m$ : 격자( $m = 1, \dots, 710$ ),  
 $n$ : 세부 지표( $n = 1, \dots, 21$ )

행렬로 구성한 후에는 세부 지표별로 수집한 자료의 단위가 상이하므로 이를 정규화하는 과정이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 MIN-MAX 방법을 활용하여 데이터를 정규화하였으며 이는 세부 지표별로 데이터의 최댓값을 1로, 최솟값을 0으로 표현되도록 변환하여 모든 데이터를 0에서 1 사이의 수로 정규화하는 방식이다. 먼저 21개 세부 지표가 폭우 피해액과 어떤 상관성을 가지는지를 피어슨 상관관계 분석을 통해 확인하여 세부 지표가 폭우 회복력에 미치는 영향을 음(-)과 양(+)으로 구분하였다. 취약성

(Vulnerability, 이하 V) 지표들은 회복력에 음(-)의 영향을 미치는 지표로 설정하고 적응 능력(Adaptive Capacity, 이하 C) 부분의 지표들은 회복력에 양(+)의 영향을 미치는 지표로 설정하였다. 따라서 회복력에 음(-)의 영향을 주는 지표는 <식 1>과 같이 역기능 지표에 대한 표준화 방법을 사용, 회복력에 양(+)의 영향을 주는 지표는 순기능 지표에 대한 표준화 방법을 사용하였다.

(순기능 지표)

$$p_{i,j} = \frac{x_{i,j} - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad \langle \text{식 1} \rangle$$

(역기능 지표)

$$p_{i,j} = \frac{\max(x) - x_{i,j}}{\max(x) - \min(x)}$$

$p_{i,j}$ : 각 지표 값을 정규화한 값

데이터를 정규화한 이후에는 세부 지표별 엔트로피 값 산정이 필요한데, 엔트로피 값은 지표 값의 분산이 클수록 크게 산정된다(<식 2> 참조).

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{i,j} \ln p_{i,j} \quad (k = 1/\ln(m)) \quad \langle \text{식 2} \rangle$$

$E_j$ : 세부 지표(j)별 엔트로피 값  
 $k$ : 분석 대상 격자의 개수를 고려하기 위한 상수

세부 지표별로 산정된 엔트로피 값( $E_j$ )을 활용하여 지표 속성값의 다양성( $d_j$ )을 산정한다. 최종적으로 세부 지표별 가중치( $w_j$ )는 특정 지표의 다양성 값( $d_j$ )을 전체 지표의 다양성 값을 합산한 값( $\sum_{j=1}^n d_j$ )으로 나누어 산출한다(<식 3, 4> 참조).

$$d_j = 1 - E_j \quad \langle \text{식 3} \rangle$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad \langle \text{식 4} \rangle$$

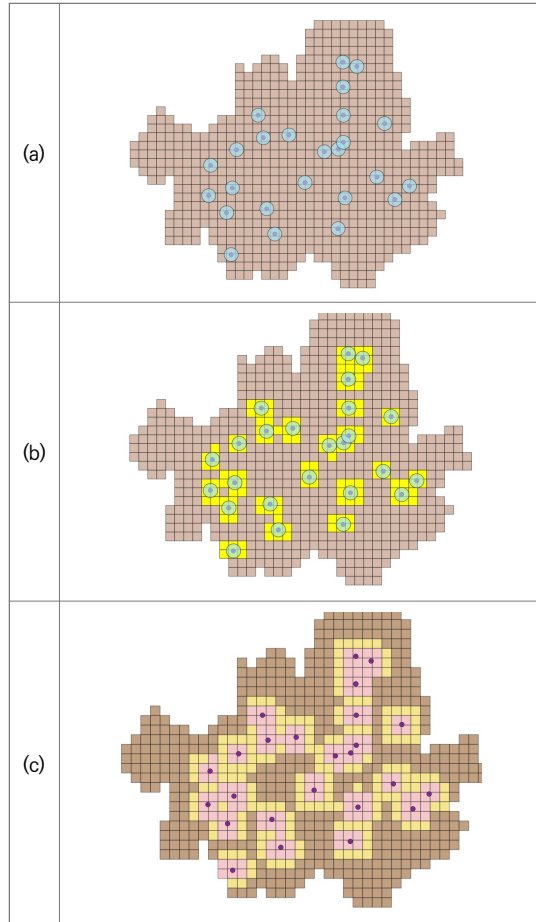
세부 지표별 가중치와 MIN-MAX 방법을 통해 표준화된 데이터 값이 확보되면 가중치가 반영된 지표 값들을 합산하여 서울시 1km×1km 모든 격자 지역의 폭우 회복력 지수를 산출할 수 있다. 합산한 값 그대로를 사용할 수도 있으나 이는 세부 지표의 개수에 따라 값의 크기가 달라질 수 있으므로 다시 한번 표준화 과정을 거친다. 이렇게 산출된 값을 폭우 회복력 지수(Heavy Rainfall Resilience Index)라고 명명하였다.

## 2) 분석 자료의 격자화

본 논문에서는 기존의 행정구역 경계가 아닌 격자 기반 데이터를 활용하였다. 격자 데이터는 규칙적인 형태와 크기를 가져 분석 및 해석이 용이하다는 장점이 있으나 행정구역 기반 데이터와는 달리 아직 데이터의 수집 단위로 적극적으로 활용되지 않고 있다. 국토교통부 공공데이터포털에서 격자형 자료로 제공되지 않는 지표들에 대해서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 원천 데이터의 격자 변환 과정을 거쳤다. 이를 위해 중심점(x, y 좌표) 방식의 지오코딩 기법을 사용하여 데이터를 변환하였다.

예를 들어, 서울시 응급실을 기준으로 거리(700m, 1,500m)에 따라 차등 점수를 부여하는 경우를 상정할 경우, <그림 1>과 같이 서울시 내 응급실의 중심점을 추출하고 포인트 좌표를 표시한 후 해당 포인트 데이터를 기반으로 750m 근방의 버퍼를 형성하였다(<그림 1>의 (a)). 이때 버퍼와 겹치는 격자에 가장 높은 가중치 또는 점수를 할당한다(<그림 1>의 (b)). 1,500m 버퍼에 대해서도 같은 방식으로 적용한 뒤 해당 격자에는 더 낮은 가중치 또는 점수를 할당한다(<그림 1>의 (c)).

그림 1 거리에 따른 차등 점수 부여



## 3) 공간 분석

각 격자는 지리적으로 구별되어 격자 간 폭우 회복력은 서로 상이하므로 폭우 회복력 지수를 활용한 공간 분석은 특정 격자 및 군집의 취약성과 적응 능력을 식별하는 데 유용하다. 이에 서울시 내 격자 단위의 폭우 회복력 지수를 활용하여 국지적 모란 지수와 전역적 모란 지수를 분석하였다. 전역적 모란 지수(Global Moran's Index)는 주변 지역 간의 유사성이나 상호 의존성을 평가하여 공간적 군집 패턴이나 분산 패턴을 검증하는 데 쓰인다(<식 5> 참조).

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \langle \text{식 5} \rangle$$

n은 분석 단위인 격자의 개수,  $x_i$ 와  $x_j$ 는 분석 단위 i와 j의 폭우 회복력 지수,  $\bar{x}$ 는 각 격자가 갖는 폭우 회복력 지수의 평균,  $W_{ij}$ 는 공간가중치 행렬을 의미한다. 모란 지수는 -1부터 +1까지의 값을 가지는데 양(+)의 값(0에서 1 사이)은 공간적 클러스터링이 존재함을 나타내며 음(-)의 값은 값들이 서로 다른 패턴이나 군집으로 분산되어 있음을 의미한다. 값이 0일 경우 공간적 자기 상관성은 존재하지 않는다.

한편 전역적 모란 지수를 통해 대상지인 서울시가 공간 연관성을 가지는지를 파악할 수는 있지만, 각 격자의 공간 연관성에 따른 국지적 패턴은 파악할 수 없다는 한계가 있다. 이처럼 전역적 모란 지수의 한계를 극복하기 위한 공간 분석 방법은 국지적 연관성 지수(Local Indicators of Spatial Association)의 일종인 국지적 모란 지수(Local Moran's I)를 산출하는 것이다. 국지적 모란 지수 또한 전역적 모란 지수와 마찬가지로 -1에서 +1까지의 값을 가지며 <식 6>과 같이 각 분석 단위(격자)가 가지는 폭우 회복력 지수의 Z-score에 기초하여 산출된다. 이때  $Z_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\delta}$  이고,  $\delta$ 는  $x_i$ 의 표준편차를 의미한다.

$$I_i = Z_i \sum_j W_{ij} Z_j \quad \langle \text{식 6} \rangle$$

### III. 분석 결과

#### 1. 서울시 격자 단위 폭우 회복력 지수

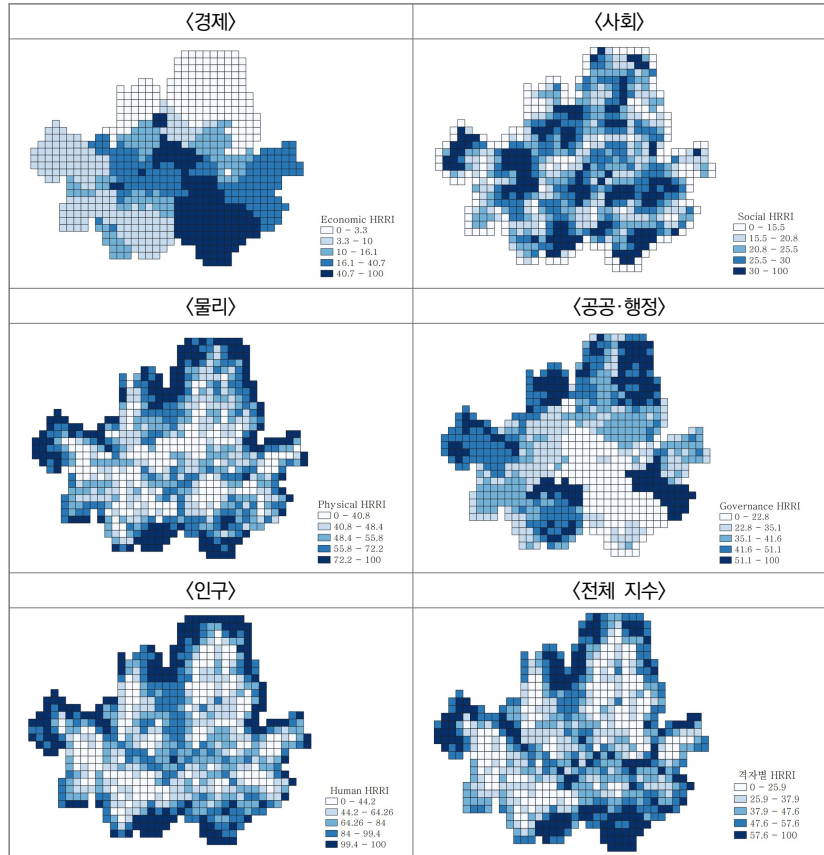
먼저 피어슨 상관관계 분석을 통해 세부 지표가 폭우

회복력에 미치는 영향을 음(-)과 양(+)으로 구분하였으며, 선행연구를 참고하여 세부 지표들의 V/C 성격을 검토하였다. 경제 영역 지표인 GRDP, 재정자립도, 1인당 지방세액 지표는 재난에 대응할 수 있는 지역사회의 경제력을 나타내는 적응 능력 측면의 지표로서 C 성격으로 구분된다. 마찬가지로, 사회 영역의 지표인 응급실과 보건소는 재난 대응을 위한 제도적 및 체계적 성격을 가지므로 C 성격의 지표로 분류된다(정휘철 2023). 노인여가복지시설의 경우, 다른 시설에 비해 주거 공간과 근거리에 위치하여 접근성이 높아 경도의 기능 제한이 있는 노인들도 충분히 활용할 수 있는 장점이 있으며(희망브리지 전국재해구호협회 2018), 이러한 이유로 재난 안전 구축 시 쉽게 이용되므로 C 지표로 구분된다. 물리 영역에서는 피어슨 상관관계 분석 결과, 방재시설과 옥상녹화는 C 지표로, 주요 공원, 녹지대, 노후 건축물, 지하층수, 토지이용 압축도는 V 지표로 분류되었다. 주요 공원과 녹지대가 V 지표로 분류된 것과 관련하여, 기존 연구에서는 이러한 녹지 공간이 폭우에 대한 취약성 인자(V)인지 적응 능력(C) 인자인지에 대한 논의가 존재한다. Kaźmierczak and Cavan(2011)은 녹지대가 증가할수록 홍수 위험이 감소할 수 있다고 설명하면서도, 일부 홍수 취약 지역에서는 녹지대의 비율과 홍수 위험 간에 양(+)의 상관관계가 나타날 수 있음을 지적하였다. 이는 녹지대가 일반적으로 홍수피해를 줄이기 위한 수단으로 사용될 수 있지만, 경우에 따라 지형적 조건 등의 이유로 녹지대가 물의 흐름을 방해하거나 오히려 물의 유출량을 증가시킬 수 있기 때문이다. 예를 들어, 도시 지역에서 녹지대를 확장하거나 설계가 잘못된 경우 물이 흐르는 경로를 막아 홍수 피해를 악화시킬 수 있다(강상준, 안창우 2006). 또한, Liao(2012)는 경사가 큰 지역에서는 녹지대가 물을 흡수하기보다 표면 유출을 증가시켜 오히려 홍수 위험을 높일 수 있다고 설명한다. 본 연구에서는

피어슨 상관관계 분석과 녹지대가 홍수 위험성에 미치는 영향에 관한 기존 학계의 논의를 종합적으로 고려하여, 서울시 지역의 녹지대 및 공원이 V 영향을 미치는 것으로 분석하였다. 공공·행정 영역의 사회복지예산 비중과 소방서 지표는 상관분석 결과 폭우 재해에 대한 적응 능력의 지표로서 C 성격의 지표로 구분되었다. 반면, 인구 관련 지표들인 인구 밀도, 고령인구, 유아 인구, 유소년 인구, 주거용도 면적 등 인구 특성을 반영하는 지표들은 V 성격의 지표로 구분되었다.

엔트로피 가중치 분석 결과 전체 지표 중에서는 재정자립도, 1인당 지방세액, 응급의료시설 접근성, 사회복지예산 비중, 소방서 개수 등이 상대적으로 높은 중요도를 지니는 것으로 나타났다. 가중치를 산출한 이후에는 각 세부 지표의 값에 지표별 가중치를 곱하여 영역별 폭우 회복력 지수와 종합 폭우 회복력 지수를 산출하였다. 경제, 사회, 물리, 공공·행정, 인구 5가지 영역에 대한 서울시 폭우 회복력 지수의 결과는 <그림 2> 및 <표 3>과 같다. 다만 경제 영역에서는 행정예산의 집행 단위가 지자체 단위라는 점을 고려하여 1인당 지방세액, 재정자립도 지표의 경우 격자 데이터가 아닌 지자체 단위의 자료를 사용하였다. 이러한 이유로 <그림 2>의 경제 영역 폭우 회복력 수준의 차이는 서울시 자치구 경계로 나타나고 있다.

그림 2 폭우 회복력 지수의 공간분포



이 외 사회, 물리, 공공·행정, 인구 영역에서는 비교적 격자별로 상이한 폭우 회복력 지수가 산출되었다.

서울시 710개 격자의 영역별 및 종합 폭우 회복력 지수는 Min-Max 표준화를 통해 최솟값이 0, 최댓값이 100점인 점수 체계로 환산되었으며, 기초통계는 <표 3>과 같다. 영역별 폭우 회복력 지수의 평균값은 경제 영역 22.6점, 사회 영역 22.3점, 물리 영역 55.5 점, 공공·행정 영역 38.2점, 인구 영역 70.1점으로 나타났다. 종합 폭우 회복력 지수의 평균값은 42.0점으로 나타났다. 710개 격자 중 평균 이상의 폭우 회복력 지수를 나타내는 격자는 365개, 평균 이하의 폭우 회복력 지수를 나타내는 격자는 345개로 나타났는데, 폭우에 대해 평균 이상의 회복력 수준을 지니는

격자들은 공통으로 인구와 물리 영역의 점수가 높게 나타났다. 이는 해당 격자들이 다른 격자 지역에 비해 주거용도 면적, 고령인구, 유아 인구, 인구밀도 등이 적고 이에 따라 노후 건축물 수, 지하층 수, 토지이용 압축도 등 물리적 측면의 지표 값 또한 작게 나타나 폭우 피해에 취약한 인구나 시설의 밀집도가 낮기 때문으로 판단된다. 반면 평균 이하의 폭우 회복력 수준을 지니는 격자는 경제, 사회, 물리, 공공·행정, 인구 영역 전반에서 상대적으로 낮은 점수로 집계되었다. 세부 지표상으로는 인구밀도와 취약 인구수, 노후 건축물 수, 지하층 수, 토지이용 압축도가 높으며 응급 의료시설이나 보건소 등 생활 및 안전시설과의 거리가 비교적 먼 것으로 나타났다.

표 3 격자 단위 폭우 회복력 지수의 기초통계

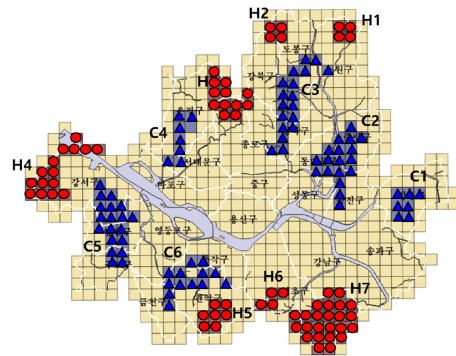
구분	최소	최대	평균
경제	0.0	100.0	22.6
사회	0.0	100.0	22.3
물리	0.0	100.0	55.5
공공·행정	0.0	100.0	38.2
인구	0.0	100.0	70.1
전체	0.0	100.0	42.0

## 2. 폭우 회복력 지수를 활용한 공간 분석

서울시 격자 단위 폭우 회복력 지수를 활용하여 산출한 전역적 모란 지수 값은 0.676, 유의확률(P-value)은 0.000으로 나타나 귀무가설을 기각하여 공간적 자기 상관성이 존재하는 것으로 나타났다. 따라서 서울시 전체 지역은 폭우 회복력 지수에 대해 양(+)의 공간적 자기 상관성을 갖는 것으로 나타났다. 이는 특정한 값을 지니는 격자의 근방에 해당 격자와 유사한 값을 지니는 또 다른 격자가 존재함을 의미한다. 또한 국지적 모란 지수를 산출하여 서울시 내 격자

간의 자기 상관성 여부와 군집 패턴을 파악한 결과, 격자 간 공간적 자기 상관성이 존재하고 유사한 값을 지니는 클러스터 13개를 식별하였다. 공간 분석 결과를 지도상에 시각화하여 패턴을 파악한 후 핫스팟 또는 콜드스팟 군집으로 분류하였다(그림 3) 참조). 핫스팟은 빨간색 동그라미로 표시된 격자 군집을 의미하며 H 군집으로 표시하였고, 콜드스팟은 파란색 세모로 표시된 격자 군집을 의미하며 C 군집으로 표시하였다.

그림 3 폭우 회복력 지수의 클러스터



주: ● 와 ▲는 각각 폭우 회복력 지수가 높은 클러스터와 낮은 클러스터를 나타냄

그 결과 핫스팟 군집 중 H1 군집은 노원구, H2 군집은 강북구·도봉구, H3 군집은 은평구·종로구·강북구, H4 군집은 강서구, H5 군집은 관악구, H6 군집은 서초구, H7 군집은 서초구, 강남구에 걸쳐 나타났다. 콜드스팟 군집 중 C1 군집은 강동구, C2 군집은 동대문구·중랑구·광진구, C3 군집은 노원구·도봉구·강북구·성북구·종로구, C4 군집은 은평구·서대문구, C5 군집은 양천구·구로구·강서구, C6 군집은 관악구에 걸쳐 나타났다.

폭우 회복력 지수가 높은 핫스팟 군집들의 영역별 평균 점수는 경제 23.7점, 사회 29.1점, 물리 80.2점, 공공·행정 45.8점, 인구 98.2점으로 나타난 반면 폭우 회복력 지수가 낮은 콜드스팟 군집의 경우 영역별

평균 점수는 경제 8.6점, 사회 21.7점, 물리 40.5점, 공공·행정 39.6점, 인구 32.4점으로 나타났다. 5가지 영역 중 특히 경제, 물리, 인구 영역은 핫스팟 군집 여부에 따라 점수의 편차가 크게 나타났다.

본 논문에서와 같이 격자 단위로 폭우 회복력 지수를 산출한 결과는 기존 선행연구들이 행정구역 경계에 기반하여 회복력 지수를 산출한 것과 차별화된 시사점을 제공한다. 첫째, 공간 분석으로 도출된 총 13개 군집(H유형 군집 7개, C유형 군집 6개)을 시군구 단위로 분석한 폭우 회복력 지수와 비교한 결과 동일한 자치구 내에서도 1km×1km 격자별로 상이한 폭우 회복력 지수를 나타내는 경우가 존재한다. 예를 들어 관악구의 경우, 시군구 분석 단위에서는 하나의 통일된 폭우 회복력 지수 값을 나타낼 것이지만 격자 단위 분석에서는 동일한 자치구임에도 불구하고 폭우 회복력 지수가 높은 핫스팟 군집(H5)과 폭우 회복력 지수가 낮은 콜드스팟 군집(C6)이 공존한다. 둘째, 서로 다른 2개 이상의 자치구일지라도 폭우 회복력 수준을 기준으로 공통된 성질을 가진 지역(군집)을 형

성하는 경우가 존재한다. 예를 들어 폭우 회복력 지수가 낮은 C2 그룹은 동대문구, 중랑구, 광진구에 걸쳐 군집을 형성하는 것으로 나타났다.

본 논문에서는 추가로 격자별로 산출한 서울시의 폭우 회복력 지수를 실제 통계로 집계된 폭우 피해액 자료와 비교 분석하였다. 행정안전통계연보에서 제공하는 폭우 피해액과 함께 서울시 침수흔적도(서울 열린데이터 광장 2018~2020)<sup>2)</sup> 자료를 활용하여 서울시 격자 단위의 폭우 피해액을 산출하였다. 침수흔적도에서 침수가 집계된 격자를 추출하여 폭우 피해액을 배분하는 방식을 활용하였다. 본 논문에서는 폭우가 발생한 최근 연도 중 침수흔적도와 폭우 피해액이 집계된 자료가 존재하며, 폭우 회복력 지수 산출의 시간적 단위와 일치하는 2020년을 주요 분석 대상으로 삼았다.

이를 통해 폭우 회복력 수준이 피해액과 어떤 연관성을 가지는지를 살펴보았다. 행정안전통계연보 자료에 따르면, 2020년 서울시 전체에서 집계된 폭우 피해액<sup>3)</sup>은 약 6억 5천만 원으로 집계되었다. 이를 격자

표 4 폭우 회복력 지수 핫스팟/콜드스팟 군집의 폭우 피해액

핫스팟(Hot Spot)			콜드스팟(Cold Spot)		
군집	피해액 (천 원)	서울 전체 폭우 피해액 대비 비중	군집	피해액 (천 원)	서울 전체 폭우 피해액 대비 비중
H1	83,489	0.01%	C1	617,512,439	96.72%
H2	-	-	C2	267,813	0.04%
H3	-	-	C3	414,196	0.06%
H4	333,527	0.05%	C4	-	-
H5	-	-	C5	-	-
H6	-	-	C6	169,398	0.03%
H7	-	-			
Total		0.09%	Total		96.86%

2) 침수흔적도란 태풍·호우·해일 등 풍수해로 인한 피해지역의 침수 흔적을 조사하여 과거의 침수 피해 상황을 데이터로 구축해 연혁별로 기록한 자료를 뜻함.  
 3) 폭우 피해액 항목 중 인명 피해는 제외하였음. 인명 피해가 발생한 정확한 지점을 파악할 수 없어 인명 피해 데이터를 격자 단위로 구축할 수 없기 때문임. 따라서 본 논문에서 폭우 피해액의 범위는 인명 피해를 제외한 물질적 피해로 한정함.

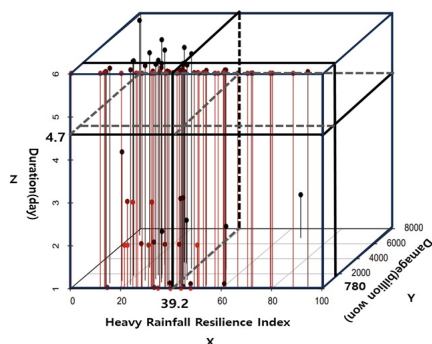
단위로 배분하기 위해, 행정안전부 ‘자연재해위험개선지구 관리지침’을 참고하여 건물, 농경지, 공공시설물 등 각 피해 항목의 침수면적과 피해액 간의 관계식을 적용하였다(행정안전부 2018). 그 결과, 서울시 전체 710개 격자 중 160개가 ‘침수 격자’로 분류되었다.

침수 피해가 집계된 군집의 폭우 피해액이 서울시 전체 폭우 피해액에서 차지하는 비중은 <표 4>와 같다. 핫스팟 군집에서 H1, H4 군집은 각각 0.01%, 0.05%였으며 콜드스팟 군집은 C1(96.72%), C3(0.06%), C2(0.04%), C6(0.03%) 순으로 폭우 피해액이 높게 나타났다. 따라서 높은 폭우 회복력 지수 값을 지닌 클러스터들의 폭우 피해액은 전체 피해액 대비 0.09%에 불과하지만 낮은 폭우 회복력 지수 값을 지닌 클러스터들의 폭우 피해액은 전체 피해액의 96.86%에 해당하여 대부분의 폭우 피해가 폭우 회복력이 낮은 격자들에 밀집하여 발생했음을 알 수 있다.

한편 폭우 회복력 지수와 폭우 피해액 간 관계를 더욱 정확하게 파악하고자 격자 단위로 데이터 구축이 가능한 가장 최근 3개년(통계청 2018~2020)의 폭우 회복력 지수와 폭우 피해액을 산출하였다. 이와 함께 폭우가 내리는 기간(빈도)을 동시에 고려함으로써 회복력 지수와 피해액 간의 관계만으로 설명되지 않는 사례들에 대한 설명을 추가하였다. 이를 위하여 2018~2020년 3개년의 침수된 격자들을 대상으로 폭우 회복력 지수와 폭우 피해액, 폭우 기간을 산출하였으며 이를 3차원 그래프로 시각화하였다. 침수 격자들의 종합 폭우 회복력 지수를 x축 변수, 폭우 피해액(억 원)을 y축 변수, 폭우 기간(일)을 z축 변수로 설정하여 각 격자의 좌표를 표시한 결과는 연도별로 <그림 4, 5, 6>과 같다. 각 축에 해당하는 중심선은 침수된 격자들의 폭우 회복력 지수, 폭우 피해액(규모), 폭우 기간(빈도)의 평균값이다.

2018년 데이터를 분석한 결과, <그림 4>가 나타내는 바와 같이 폭우 회복력 지수(X축)가 낮을수록 일반

**그림 4** 폭우 기간에 따른 폭우 회복력 지수 및 피해액 분포(2018년)

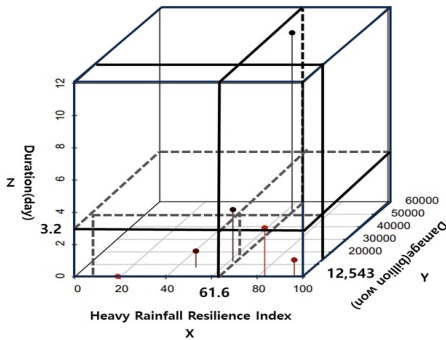


주: 2018년 폭우 회복력 지수 평균은 39.2, 평균 피해액은 780억 원, 평균 폭우 기간은 4.7일임.

적으로 폭우 피해액(Y축)이 증가하는 고회복력-저피해 경향이 관찰되었다. 그러나 폭우 회복력 지수(X축)가 높은 격자 중에서도 폭우 피해액(Y축)이 상당히 큰 고회복력-고피해 사례들이 존재함을 확인할 수 있었다. 이를 더 깊이 분석하기 위해, 그림에 제시된 3차원 그래프를 활용하여 폭우 회복력 지수(X축), 폭우 피해액(Y축), 폭우 기간(Z축) 간의 관계를 살펴본 결과, 이러한 격자들은 평균 폭우 기간(Z축에서 4.7일)을 크게 초과하는 긴 폭우 기간을 겪었다는 점이 밝혀졌다. 이 그림은 폭우 회복력 지수(X축)가 높은 지역일지라도, 폭우 기간(Z축)이 길어지면 폭우 피해액(Y축)이 증가할 수 있음을 시사한다.

2019년의 경우, 침수된 격자의 수는 많지 않지만, <그림 5>에서 나타난 바와 같이 대다수의 침수 격자가 폭우 회복력 지수(X축)가 낮고 피해액(Y축)이 높은 영역 또는 폭우 회복력 지수(X축)가 높고 피해액(Y축)이 적은 영역에 위치하여 각각 저회복력-고피해 및 고회복력-저피해의 양상을 보인다. 그러나 한 개의 침수 격자는 이와 다른 양상으로, 폭우 회복력 지수(X축)와 피해액(Y축)이 모두 높은 고회복력-고피해 경향을 보이며, 이 격자의 피해액은 다른 격자들에 비해 매우 크게 나타났다. 이 상황에서 폭우 기간(Z축)을

**그림 5** 폭우 기간에 따른 폭우 회복력 지수 및 피해액 분포(2019년)

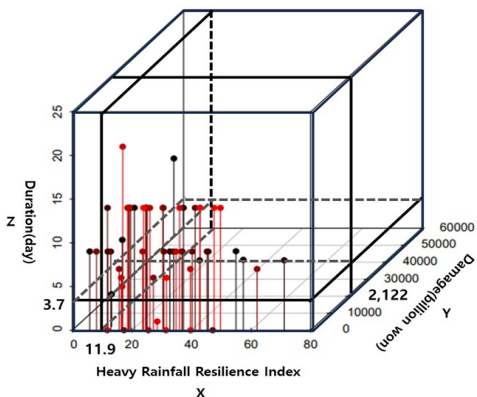


주: 2019년 폭우 회복력 지수 평균은 61.6, 평균 피해액은 12,543원, 평균 폭우 기간은 3.2일임.

추가로 고려한 결과, 해당 격자의 폭우 기간은 평균 폭우 기간(Z축에서 3.2일)을 크게 초과하는 12일인 것으로 확인되었다.

2020년의 경우, <그림 6>에서 확인할 수 있듯이, 다수의 격자가 폭우 회복력 지수(X축)가 낮고 피해액(Y축)이 높은 고회복력-저피해 모습을 보였다. 3차원 그래프를 통해 폭우 회복력 지수(X축), 폭우 피해액(Y축), 폭우 기간(Z축) 간의 관계를 분석한 결과, 폭우 회복력 지수와 피해액이 모두 높은 격자들의 경우,

**그림 6** 폭우 기간에 따른 폭우 회복력 지수 및 피해액 분포(2020년)



주: 2020년 폭우 회복력 지수 평균은 11.9, 평균 피해액은 2,122원, 평균 폭우 기간은 3.7일임.

폭우 기간이 평균(Z축에서 3.7일)을 초과하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞선 연도들과 마찬가지로 폭우 회복력 지수가 상대적으로 높더라도, 폭우 기간이 길어짐에 따라 폭우 피해액이 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 결과는 폭우 회복력 지수만으로는 폭우 피해를 완전히 설명하기 어려우며, 폭우 기간과 같은 기후적 요소도 중요한 영향을 미친다는 것을 시사한다. 따라서, 정책적 대응 시 폭우 회복력뿐만 아니라 폭우 기간과 같은 기후적 측면을 함께 고려해야 하며, 장기적인 폭우에 대비한 추가적인 대응책이 필요함을 강조할 수 있다.

#### IV. 요약 및 결론

본 논문은 1km×1km 격자 단위에서 서울시 지역의 폭우 회복력 수준을 진단하고 폭우 회복력 지수를 활용한 공간 분석을 수행하였다. 이러한 미시적 단위의 분석 시도는 폭우 재해에 대해 공간이 지닌 특성을 파악함에 있어서 단순히 행정경계에 기반을 두는 것이 아니라 각 격자가 고유하게 지닌 폭우 회복력 수준을 고려할 수 있다는 점에서 의의가 있다. 본 논문에서는 자치구 내 격자 간 데이터에 차이가 없는 행정 관련 지표는 제외하고, 모든 지표를 동일한 공간 단위로 구축하기 위해 1km 격자를 분석 단위로 설정하여 공간 분석의 일관성을 유지하고자 하였다. 향후 연구에서는 500m 또는 100m 격자 단위로 모든 지표에 대해 정량적 자료를 수집하거나 새로이 구축함으로써 더욱 정밀한 분석이 가능할 수 있을 것이다. 또한, 일부 선행연구에서는 공간 분석 단위를 통일하지 않고 각 지표의 가장 세밀한 데이터를 사용하여 분석한 사례도 존재하나, 이는 결과를 비교하거나 종합적으로 해석하는 데 있어 어려움과 모호성을 초래할 수 있는 한계가 있음을 인식할 필요가 있다.

한편 폭우 회복력 지수를 산출하기 위해 경제, 사

회, 물리, 공공·행정, 인구 영역의 지표를 활용하였다. 선별된 지표 중에는 지역의 생태적 특성을 반영하는 녹지대 비율이나 옥상 녹화 등의 요소가 포함되었으나, 후속연구에서는 경사와 같은 지형적 요소나 최근 일정 동안의 평균 연 강수량과 같은 기후요인을 추가로 고려할 수 있을 것이다. 선행연구에서도 재해 회복력을 평가할 때 기후요인의 중요성이 강조된 바 있다(박소연, 윤상훈 2017). 다만, 본 논문의 회복력 개념을 유지하기 위해서는 외부 충격의 성격을 지닌 기후 특성이 아닌, 해당 지역의 본래 기후추세나 일반적 특성을 반영하여 분석의 정확도를 높이는 것이 중요하다.

폭우 회복력 지수는 서울시 지역의 1km 단위격자 710개에 대하여 경제, 사회, 물리, 공공·행정, 인구 영역을 포괄하는 종합 점수를 산출하였으며, 이 지수를 활용하여 핫스팟 분석을 시행함으로써 폭우 회복력 수준이 상대적으로 높은 핫스팟 격자의 군집과 폭우 회복력 수준이 상대적으로 낮은 콜드스팟 격자의 군집을 식별할 수 있었다. 그 결과, 관악구와 같이 하나의 행정 자치구 내에서도 폭우 회복력 수준이 서로 다른 군집들이 공존하는 사례(H5 군집과 C6 군집)를 확인할 수 있었다. 또한, 유사한 폭우 회복력 수준을 가진 격자 군집이 반드시 하나의 자치구 내에만 국한되지 않고, 여러 자치구의 경계를 넘나들며 분포한다는 점도 발견되었다. 이는 폭우 재해에 효과적으로 대응하기 위해서는, 단일 자치구 내에서도 각 구역의 폭우 회복력 수준을 정밀하게 분석한 후 해당 수준에 맞춘 단계별 전략을 수립하거나 차별화된 대응 방법을 마련해야 한다는 중요한 시사점을 제공한다. 유사한 폭우 회복력 수준을 지니거나 폭우 회복력에 대한 공간적 패턴이 유사한 구역에서는 해당 구역이 서로 다른 자치구에 속해 있더라도 자치구 간 협업을 통해 공동 대응 정책을 수립하는 것이 중요하다. 특히, 자치구 경계에 걸친 격자는 여러 행정구역이 같은

문제를 공유할 수 있기 때문에, 이들 간의 협력을 통해 일관된 대응 전략을 마련하는 것이 필수적이다. 또한, 격자 단위 분석을 통해 특정 지역의 취약성을 명확히 파악함으로써 폭우와 같은 위급한 상황에서 제한된 자원을 보다 효과적으로 배분할 수 있을 것이다. 이처럼 격자 단위 분석은 도시 내 세부적인 물리적, 사회적, 환경적 조건의 차이를 미세한 공간 단위에서 반영할 수 있어, 각 격자의 특성에 맞춘 맞춤형 재해 대응 전략을 수립하는 데 매우 유용하다. 또한 자치구 간 협력이 필요한 경계 지역에서 특히 중요한 의미가 있으며, 전체적인 도시 회복력을 강화하는 데 있어 필수적인 전략적 도구로 기능할 수 있다.

한편 본 논문에서는 서울시에서 제공하는 침수흔적도 자료를 활용하고, 행정안전부의 자연재해위험 개선지구 관리지침을 참고하여 건물, 농경지, 공공시설물 등의 각 피해 항목에 대한 침수면적과 피해액 간의 관계식을 적용하여 폭우 피해액을 격자 단위로 분석하였다. 그러나 침수흔적도는 2015년과 2021년 등 일부 연도의 데이터가 제공되지 않아 데이터의 연속성이 확보되지 않는 한계가 있다. 이로 인해 장기간에 걸친 폭우 피해액의 분석이 어려웠으며, 그 결과 2022년 기준 최근 5년 자료(2018~2022년) 중 연속적으로 폭우 피해가 집계된 2018~2020년의 데이터를 분석에 사용하였다. 따라서, 본 논문에서 분석한 폭우 피해액의 기간이 짧아 해당 지역의 대표적인 폭우 특성을 충분히 반영하지 못할 가능성이 있다. 후속 연구에서는 더 장기간에 걸친 폭우 피해액 데이터를 격자 단위로 산출하여 폭우 회복력 지수와와의 세밀한 관계를 파악할 필요가 있음을 제언한다.

2018~2020년에 침수된 격자들을 대상으로 폭우 회복력 지수-폭우 피해액-폭우 기간 간의 관계를 3차원 그래프로 시각화한 결과, 회복력 지수가 높을수록 피해액이 낮고, 회복력 지수가 낮을수록 피해액이 상대적으로 높게 나타났다. 그러나 폭우 기간이 길어질

경우 회복력이 높은 격자에서도 폭우 피해액이 클 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 분석적 및 정책적 측면에서 다음과 같은 시사점을 제공한다. 먼저 분석적 측면에서는 폭우 회복력 지수를 산출하는 것과 함께, 외부 충격 요소(예: 폭우의 지속 시간 또는 강도)를 독립적으로 고려하여 이들 간의 관계를 더 명확하게 이해할 필요가 있다. 본 논문에서 산출한 폭우 회복력 지수는 각 격자의 폭우 대응 능력과 취약성을 내포하고 있으나, 격자별로 폭우가 지속되는 기간의 영향을 반영하지 못한다는 한계가 있다. 따라서, 후속 연구에서는 폭우 기간, 강도와 같은 외부 충격 요소를 회복력 지수와 별도로 분석함으로써, 회복력 지수와 폭우 피해액 간의 관계를 더욱 구체적이고 정밀하게 설명할 수 있을 것으로 기대된다.

한편 정책적 측면에서는 폭우 발생에 따른 피해를 줄이기 위해서 폭우 기간이 길어질 것에 대비한 정책이 함께 고안되어야 한다는 시사점을 제공한다. 본 논문의 분석 결과를 통해 폭우 회복력 지수가 낮은 격자일수록 폭우 피해액이 높게 나타난다는 사실을 파악할 수 있었으며, 또한 폭우 회복력 수준이 높음에도 불구하고 폭우 기간이 길어짐에 따라 폭우 피해액이 큰 폭으로 증가할 수 있다는 점을 밝혀냈다. 따라서 폭우 회복력 수준이 상대적으로 높은 지역일지라도 폭우의 기간이 길어질 것으로 예상되거나, 과거에 발생하였던 폭우 기간이 평균적으로 길었다면 장기간 폭우에 대비한 피해 방지 정책을 마련해야 할 필요가 있다.

## • 참고문헌

## References

1. 공공데이터포털. <https://www.data.go.kr> (2022년 8월 10일 검색).  
Open Data Portal. <https://www.data.go.kr> (accessed August 10, 2022).
2. 국가통계포털. <https://kosis.kr> (2022년 6월 20일 검색).  
Korean Statistical Information Service. <https://kosis.kr> (accessed June 20, 2022).
3. 국토지리정보원. 2023. <https://www.ngii.go.kr/kor/main.do> (2022년 12월 10일 검색).  
National Geographic Information Institute. 2023. <https://www.ngii.go.kr/kor/main.do> (accessed December 10, 2022).
4. 강상준, 안창우. 2006. 소유역의 토지이용 변화에 따른 하천 유량과 수질 변화에 관한 연구. 국토연구 50권: 3-18.  
Sangjun Kang and Changwoo Ahn. 2006. Impacts of land use change on discharge regime and water quality in a small watershed. *The Korea Spatial Planning Review* 50: 3-18.
5. 강유진, 왕원준, 이하늘, 김경탁, 김수전, 김형수. 2021. 격자단위 공간분석자료를 활용한 정량적 홍수피해 평가. 한국방재학회 논문집 21권, 6호: 265-273.  
Yujin Kang, Wonjoon Wang, Haneul Lee and Kyungtak Kim. 2021. Ouantative Flood Damage Evaluation Using Grid-Based Spatial Analysis Data. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation* 21, no.6: 265-273.
6. 김동현, 송슬기, 이현영, 강상준, 권태정, 김진오, 남기찬 외. 2015. 도시의 기후 회복력 확보를 위한 공간단위별 평가체계 및 모형 개발 (I). 서울: 한국환경정책·평가연구원.  
Donghyun Kim, Seulki Song, Lee Heonyoung, Kang Sangjun, Gwon Teajung and Nam Gichan et al. 2015. *Urban Climate Resilience: Operationalization and Evaluation (I)*. Seoul: Korea Environment Institute.
7. 김동현, 송슬기, 강상준, 권태정, 김진오, 남기찬, 윤동근 외. 2016. 도시의 기후 회복력 확보를 위한 공간단위별 평가체계 및 모형 개발 (II). 서울: 한국환경정책·평가연구원.  
Donghyun Kim, Seulki Song, Kang Sangjun, Gwon Teajung, Nam Gichan and Yoon Donggeun. 2016. *Urban Climate Resilience: Operationalization and Evaluation (II)*. Seoul: Korea Environment Institute.

8. 김성희. 2020. 공간단위별 산업집적 분석 방법 연구: 뿌리산업을 중심으로. *한국콘텐츠학회논문지* 20권, 6호: 256-266.  
Seonghee Kim. 2020. Analysis Methodology of Industrial Integration by Spatial Unit: Based on Root Industry. *The Journal of the Korea Contents Association* 20, no.6: 256-266.
9. 김정일. 2021. 지역별 홍수회복력 특성에 따른 홍수회복력 분석. 박사학위논문, 서울대학교.  
Cheongil Kim. 2021. *Analysis of Community Flood Resilience in relation to Characteristics of Flood Damage*. Ph.D. diss., Seoul National University.
10. 김현준, 황환국, 이동섭, 김영택, 박문형, 김형준 외. 2018. 도심지 홍수예방 연구개발. 고양: 한국건설기술연구원.  
Kim Hyeonjun, Hwang Hwan-Kook, Rhee Dongsop, Kim Young Teak, Park Moon Hyeong and Kim Hyng Jun et al. 2018. *Development of Urban Flood Mitigation Technology (Smart Flood Management)*. Goyang: Korea Institute of Civil Engineering and Bulding Technology.
11. 박소연, 윤상훈. 2017. 풍수해 재난 회복력에 영향을 미치는 지역특성요인 규명. *국토연구* 92권: 59-73.  
Soyeon Pak and Sanghoon Yoon. 2017. An Analysis of Regional Characteristic Factors Affecting for Resilience of Damage by Storm and Flood. *The Korea Spatial Planning Review* 92: 59-73.
12. 박한나, 송재민. 2015. 회복탄력성 비용지수를 활용한 회복탄력성 주요 영향 요인 분석: 서울시 풍수해를 대상으로. *국토계획* 50권, 8호: 95-113.  
Hanna Park and Jaemin Song. 2015. Identification of Main Factors Affecting Urban Flood Resilience Using Resilience Cost Index: A case of flooding in Seoul City, Korea. *Journal of Korea Planning Association* 50, no.8: 95-113.
13. 서세교, 장새움, 정주철. 2022. 지역 침수피해 특성에 따른 재해 회복력 지수 분석. *한국방재학회논문집* 22권, 6호: 55-67.  
Seo, Segyo, Jang, Saewoom and Jung, Juchul. 2022. Analysis of Disaster Resilience Index using Regional Flood Damage Characteristics. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation* 22, no.6: 55-67.
14. 서울 열린데이터 광장. 2018~2020년 서울시 침수흔적도. <https://data.seoul.go.kr/dataList/OA-15636/F/1/datasetView.do> (2023년 4월 3일 검색).
- Seoul Open Data Plaza. 2018~2020 Seoul Flood Inundation Map. <https://data.seoul.go.kr/dataList/OA-15636/F/1/datasetView.do> (accessed April 3, 2023).
15. 손민우, 성진영, 정은성, 전경수. 2011. 기후변화를 고려한 홍수취약성지표의 개발. *한국수자원학회논문집* 44권, 3호: 231-248.  
Minwoo Son, Jinyoung Sung, Eunsung Chung and Kyungsoo Jun. 2011. Development of Flood Vulnerability Index Considering Climate Change. *Journal of Korea Water Resources Association* 44, no.3: 231-248.
16. 유가영, 김인에. 2008. 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안. 서울: 한국환경정책·평가연구원.  
Gayoung Yoo and Inae Kim. 2008. *Development and Application of a Climate Change Vulnerability Index*. Seoul: Korea Environmental Institute.
17. 이동성, 문태훈. 2019. 도시 및 기후특성이 에너지 회복력에 미치는 영향: 정전발생시간을 중심으로. *국토계획* 54권, 4호: 122-130.  
Lee, DongSung and Moon, Tae-Hoon. 2019. The Effect of Urban and Climate Characteristics on Energy Resilience: Focusing on Blackout Time. *Journal of Korea Planning Association* 54, no.4: 122-130.
18. 정휘철. 2022. 적응 정책 수립 지원을 위한 기후위험 평가 체계 및 방법. 기후리스크관리 TF 월례 포럼, 7월 19일. 서울: 코리안리. [https://koreanre.co.kr/USER\\_DATA/koreanre/content/editor/pdf/7%ED%9A%8C\\_%ED%8F%AC%EB%9F%BC%EB%B0%9C%ED%91%9C\\_%EC%A0%95%ED%9C%98%EC%B2%A0%EB%B0%95%EC%82%AC.pdf](https://koreanre.co.kr/USER_DATA/koreanre/content/editor/pdf/7%ED%9A%8C_%ED%8F%AC%EB%9F%BC%EB%B0%9C%ED%91%9C_%EC%A0%95%ED%9C%98%EC%B2%A0%EB%B0%95%EC%82%AC.pdf) (2023년 5월 20일 검색).  
Hwichul Jung. 2022. Climate risk assessment system and method for supporting adaptation policy formulation. *Climate Risk Management TF Monthly Forum*, July 19. Seoul: Koreanre. [https://koreanre.co.kr/USER\\_DATA/koreanre/content/editor/pdf/7%ED%9A%8C\\_%ED%8F%AC%EB%9F%BC%EB%B0%9C%ED%91%9C\\_%EC%A0%95%ED%9C%98%EC%B2%A0%EB%B0%95%EC%82%AC.pdf](https://koreanre.co.kr/USER_DATA/koreanre/content/editor/pdf/7%ED%9A%8C_%ED%8F%AC%EB%9F%BC%EB%B0%9C%ED%91%9C_%EC%A0%95%ED%9C%98%EC%B2%A0%EB%B0%95%EC%82%AC.pdf) (accessed May 20, 2023).
19. 통계청. 2018~2020. 행정안전통계연보.  
Statistics Korea. 2018~2020. Statistical Yearbook.
20. 행정안전부. 2018. 자연재해위험개선지구 관리지침(2018년 11월 13일 개정, 고시 제2018-073호).  
Ministry of the Interior and Safety. 2018. Guidelines

- for the Improvement of Natural Disaster Risk Areas (revised 13 November 2018, Notice No. 2018-073).
21. 희망브리지 전국재해구호협회. 2018. 고령화시대의 재난안전망 구축방안. 서울: 희망브리지 전국재해구호협회. Korea Disaster Relief Association (Hope Bridge). 2022. *A Study on the Construction Plan of Disaster Safe-Net Against Aging Society*. Seoul: Korea Disaster Relief Association (Hope Bridge).
  22. Anderson, M. G., Clark, M. and Sheldon, A. O. 2014. Estimating climate resilience for conservation across geophysical settings. *Conservation Biology* 28, no.4: 959-970.
  23. Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M. and Shinozuka, M. et al. 2003. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra* 19, no.4: 733-752.
  24. Cutter, S. L., Burton, C. G. and Emrich, C. T. 2010. Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions. *Journal of Homeland Security and Emergency Management* 7, no.1.
  25. IPCC. 2001. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. *Summary for Policymakers*. Geneva: WMO.
  26. Kaźmierczak, A. and Cavan, G. 2011. Surface water flooding risk to urban communities: Analysis of vulnerability, hazard and exposure. *Landscape and Urban Planning* 103, no.2: 185-197.
  27. Liao, K.-H. 2012. A theory on urban resilience to floods—a basis for alternative planning practices. *Ecology and Society* 17, no.4.
  28. McClymont, K., Morrison, D., Beevers, L., and Carmen, E. 2020. Flood resilience: a systematic review. *Journal of Environmental Planning and Management* 63, no.7: 1151-1176.
  29. Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. 2012. Flood Management in Japan. Japan: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism(MLIT). [https://www.mlit.go.jp/river/basic\\_info/english/pdf/conf\\_01-0.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/english/pdf/conf_01-0.pdf) (accessed May 10, 2023).
  30. Nhemachena, C. and Hassan, R. 2007. Micro-level analysis of farmers adaptation to climate change in Southern Africa. Washington, DC: International Food Policy Research Institute.
  31. Price, D., Hudson, K., Boyce, G., Schellekens, J., Moore, R. J., Clark, P. and Harrison, T. et al. 2012. Operational use of a grid-based model for flood forecasting. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* 165, no.2: 65-77.
  32. Thorne, J., Wayburn, L. and Urban, D. 2020. *Planning for Species Adaptation and Climate Resilience in California's Primary Source Headwaters*. San Francisco, CA: Pacific Forest Trust.
  33. Timmermann, P. 1981. Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society: A Review of Models and Possible Climatic Applications. *Environmental Monograph No 1*. Toronto: Institute of Environmental Studies.
  34. Tyler, S., Nugraha, E., Nguyen, H. K., Van Nguyen, N., Delima Sari, A., Thinpanga, P. and Thanh Tran, T. et al. 2016. Indicators of urban climate resilience: A contextual approach. *Environmental Science & Policy* 66: 420-426.
  35. Zevenbergen, C., Gersonius, B., and Radhakrishnan, M. 2020. Flood resilience. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 378, no.2168: 20190212.
  36. Ziarh, G. F., Asaduzzaman, M., Dewan, A., Nashwan, M. S., and Shahid, S. 2021. Integration of catastrophe and entropy theories for flood risk mapping in peninsular Malaysia. *Journal of Flood Risk Management* 14, no.1: e12686.

- 
- 논문 접수일: 2024. 7. 20.
  - 심사 시작일: 2024. 8. 2.
  - 심사 완료일: 2024. 9. 2.

## 요약

본 논문은 서울시 1km 격자 단위로 폭우 회복력 지수를 분석하였다. 핫스팟 분석 결과, 행정구역 내에서도 높은 군집과 낮은 군집이 동시에 나타나거나, 여러 자치구에 걸쳐 유사한 폭우 회복력 수준의 군집이 존재함을 확인하였다. 이는 재해 대응에서 각 구역의 회복력 수준을 정밀하게 파악하고, 지자체 간 협력을 통해 공동 대응 전략이 필요함을 시사한다. 또한, 폭우 회복력 지수와 폭우 피해액의 관계를 분석한 결과, 회복력이 낮은 격자에서 피해가 집중되었고, 폭우 기간이 길어질수록 회복력이 높아도 큰 피해를 입을 수 있음을 보여준다. 이는 분석적 측면에서 폭우 회복력 지수와 별도로 폭우의 기간과 같은 외부 충격요인을 추가로 분석, 그리고 정책적 측면에서는 폭우 기간별 대응 정책 마련의 필요성을 보여준다.

- **주제어:** 기후회복력, 격자, 엔트로피 가중치, 공간 분석, 폭우
-