creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

경제학석사 학위논문

기후회복력(Climate Resilience)의 공간분석 연구

- 서울시 폭우를 중심으로 -

2023년 8월

서울대학교 대학원

농경제사회학부 농업·자원경제학 전공

백 영 선

기후회복력(Climate Resilience)의 공간분석 연구

- 서울시 폭우를 중심으로 -

지도교수 안 동 환

이 논문을 경제학석사 학위논문으로 제출함
2023년 8월

서울대학교 대학원
농경제사회학부 농업·자원경제학 전공

백 영 선

백영선의 경제학석사 학위논문을 인준함
2023년 8월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

최근 기후변화의 영향으로 국지적인 지역에 많은 비가 내리는 폭우 재해의 빈도가 증가하고 있으며 기후회복력(Climate Resilience)에 대한 연구자들의 관심이 높아지고 있다. 폭우 재해에 관한 기존의 선행연구들은 폭우의 피해 규모나 범위를 파악하는 데 주로 초점이 맞추어져 있으며 폭우에 대한 회복력을 진단한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 본 연구의 목적은 건물과 인프라가 밀집하여 폭우에 의한 침수 피해가 상대적으로 큰 서울시를 대상으로 1km x 1km 격자 공간 단위의 폭우회복력지수를 산출하고 폭우회복력지수의 공간적 패턴을 파악하는 것이다. 이후 격자별 폭우회복력지수를 활용하여 공간분석의 일종인 핫스팟 분석을 통해 폭우회복력의 공간적 패턴을 파악하고자 하였다. 본 연구에서는 기후회복력을 기후변화 및 재해에 대하여 취약성을 감내하고 피해에 대한 적응능력을 포괄하는 개념으로 정의하였으며, 회복력을 취약성과 적응능력으로 구성되는 개념으로 설정하였다. 또한 이 연구는 다양한 기후변화 양상 중 특히 폭우 재해에 대한 공간의 회복력을 파악하는 연구라는 점에서 기후회복력 대신 '폭우회복력'이라는 용어로 통일하였다.

분석 자료로는 국토지리정보원, 공공데이터포털, 통계청에서 제공하는 인구, 토지, 인프라, 경제 등 자료를 활용하였고 격자별 폭우회복력지수를 100점 만점으로 산출하였다. 공간분석 결과 폭우회복력지수가 서울시 내 710개 격자들의 평균 수준을 상회하는 핫스팟(Hot spot) 지역 7곳과 폭우회복력지수가 평균 수준을 하회하는 콜드스팟(Cold Spot) 지역 6곳이 식별되었다. 이는 행정경계에 따른 지역 군집이 아니라 폭우에 대한 회복력수준을 기준으로 설정된 지

역으로서 폭우 회복력에 대해서 유사한 지역들이 모인 군집임을 뜻한다. 이러한 분석 결과는 기존 선행연구들의 행정경계 기반의 폭우 재해 연구와 차별점을 가지며 보다 미시적인 공간 단위에서 지역의 폭우회복력 수준을 파악할 수 있음을 보여준다. 마지막으로 2018, 2019, 2020년에 대하여 서울시의 1km 격자 단위 폭우회복력 지수와 폭우피해액, 폭우기간을 세 축으로 하는 3차원 그래프를 통해 폭우회복력 수준과 폭우 피해 규모 및 빈도를 종합적으로 고려한 분석 결과의 해석과 분석적, 정책적 측면의 시사점을 제시하였다.

본 연구 결과는 격자라는 미시적인 공간 단위에서 폭우회복력지수의 공간적 분포와 패턴을 이해하는 데 유용하며, 현실에서는 재난 대응과 도시계획에 관한 의사결정 과정에서 효과적인 정책을 취할 수 있는 근거 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 예를 들어 환경부에서 주관하는 도시침수예보 사업의 경우, 사업 대상 권역이나 침수 예보 권역을 설정하는 과정에서 폭우에 대하여 유사한 수준의 회복력을 지니는 격자 군집을 사업의 대상지로 설정할 수 있다. 이와 같이 폭우 피해 방지 사업의 시행 지역을 선정하거나 사업의 효과가 적용될 수 있는 예상 범위를 고려하는 과정에서 연구의 분석 결과가 유용한 자료로 활용될 것으로 사료된다.

주요어 : 기후회복력, 격자, 엔트로피 가중치, 공간분석, 폭우
학 번 : 2021-28806

목 차

제 1 장 서론 ····· 1
제 1 절 연구배경 및 필요성 ····· 1
제 2 절 연구목적 ····· 2
제 3 절 선행연구 검토 ····· 3
제 4 절 논문의 구성 ····· 5

제 2 장 기후회복력의 정의 ····· 6
제 1 절 기후회복력(Climate Resilience)의 개념 ····· 6
제 2 절 회복력(Resilience)의 유관개념 ····· 7
1. 취약성(Vulnerability) ····· 7
2. 적응능력(Adaptive Capacity) ····· 8
3. 회복력, 취약성, 적응능력의 관계 ····· 8

제 3 장 분석자료 및 분석방법 ····· 11
제 1 절 분석자료 ····· 11
제 2 절 분석방법 ····· 15
1. 폭우회복력지수 산출 ····· 15
2. 분석자료의 격자화 ····· 17
3. 공간 분석 ····· 20

제 4 장 분석결과 ····· 23
제 1 절 서울시 격자 단위 폭우회복력지수 ····· 23
제 2 절 폭우회복력지수를 활용한 공간분석 ····· 26
제 3 절 폭우회복력지수와 피해규모·빈도 간 관계 ····· 32

제 5 장 요약 및 결론 ····· 40

표 목 차

<표 1> 폭우회복력지수 산출을 위한 세부지표 ····· 12
<표 2> 세부지표의 기초통계량 ····· 13
<표 3> 개선법에 따른 피해항목별 폭우피해액 계산 방법 ····· 20
<표 4> 국지적 공간연관성의 유형 ····· 22
<표 5> 세부지표별 엔트로피 가중치 ····· 24
<표 6> 격자단위 폭우회복력지수의 기초통계 ····· 26
<표 7> 군집유형별(H,C)-영역별 폭우회복력지수 ····· 29
<표 8> 군집별(H1~H7, C1~C6)-영역별 폭우회복력지수 ····· 29
<표 9> 폭우회복력지수 Hot/Cold Spot 군집의 폭우피해액 ·· 32

그 림 목 차

<그림 1> 회복력, 취약성, 적응능력 개념 간 관계 ····· 9
<그림 2> 거리에 따른 차등 점수 부여 ····· 18
<그림 3> 서울시 격자 단위 폭우회복력지수 지도(영역별·종합) ·· 25
<그림 4> 서울시 폭우회복력지수의 공간적 자기상관성 ···· 27
<그림 5> 서울시 격자 단위 폭우회복력지수 기반 군집 유형 ··· 28
<그림 6> 서울시 격자 및 시군구 단위의 폭우회복력지수 ····· 31
<그림 7> 2018년 폭우회복력지수-폭우피해액-폭우기간 ····· 33
<그림 8> 2019년 폭우회복력지수-폭우피해액-폭우기간 ····· 34
<그림 9> 2020년 폭우회복력지수-폭우피해액-폭우기간 ····· 35
<그림 10> 2023년 도시침수예보 시범운영 지역과 폭우회복력 군집 ·· 38

제 1 장 서론

제 1 절 연구배경 및 필요성

기후변화는 분야를 막론하고 현대 사회가 직면한 가장 심각한 문제 중 하나이다. 지구 온난화로 인해 기상 현상은 예상치 못한 변화와 극단성을 나타내며 이는 지역별로 다양한 재해를 초래하고 있다. 특히 폭우는 기후변화의 영향을 강하게 받는 재해 유형으로서 전 세계적으로 그 빈도와 강도가 증가하고 있다. 국내에서도 폭우 피해의 사례와 규모는 이전과 다르게 증가하는 추세이다. 2022년 서울시를 비롯한 수도권 지역에서는 지역적으로 강한 폭우가 발생하면서 다수의 주택과 건물, 사업장이 침수되었고 재난 복구에도 상당한 시간과 비용이 소요되었다. 주목할 점은 단순히 폭우의 빈도와 규모가 커진 것뿐만 아니라 국소적인 지역 단위로 강한 비가 내리는 지역적 성격의 폭우가 잦아졌다는 점이다. 이와 같은 형태의 폭우 피해 상황은 사람들로 하여금 폭우 피해로부터의 저항능력을 진단 및 강화하며 폭우 피해 경감을 위한 대응정책과 방안을 모색하도록 한다. 특히 폭우로 인한 도시 지역의 피해가 지속적으로 발생하고 있다. 2014년에는 서울시 마포구 홍대입구역 지하상가가 침수되었고, 2017년에는 홍수 발생으로 서울 은평구, 강서구, 서대문구의 저지대 도로 및 주택이 침수되는 피해가 발생하였다. 경기도 일산동구에서는 100여 건의 주택과 상가 침수 피해가 발생하였다(박인환 외, 2018). 이처럼 도심지의 지속적인 침수 피해로 인해 서울시 등을 중심으로 침수 피해를 방지하고 개선하기 위한 사업이 추진되고 있어 도심지 폭우 피해를 저감시키기 위한 연구가 필요한 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 인구, 건물, 인프라 등이 밀집한 서울시 지역의 폭우 피해 상황을 배경으로 서울시 내 격자 단위로 폭우회복력지수를 산출하고, 핫스팟 분석을 통해 폭우 회복력이 높고 낮은 클러스터를 식별하는 연구를 수행하고자 한다. 기존의 행정구역 경계 기반의 연구와는 달리 격자 기반의 폭우회복력 정량화와 공간분석 연구가 가지는 장점은

세부적인 지역 패턴을 파악할 수 있다는 것이다. 실제로 국가 차원에서도 보다 미시적인 단위에서 정책을 수립하고자 격자 기반 분석을 도입하고 있는 상황으로, 격자 기반의 공간정보 데이터를 제공하는 플랫폼도 점차 증가하고 있다. 대표적인 예로 국토교통부 고시 2019년 2월부터 격자기반 분석이 단계적으로 포함되면서 국가지점번호체계, 도시계획기초조사정보체계 등에 있어서도 격자 도입이 적극적으로 추진되고 있다.

따라서 폭우회복력 진단에 활용할 수 있는 격자형 통계자료를 수집하고 비격자형 통계자료를 격자화하여 미시적인 단위에서 격자별 폭우회복력을 진단하는 본 연구는 행정구역 경계를 넘어서서 폭우회복력을 더욱 정밀한 단위에서 진단할 수 있다는 의의를 지닌다.

제 2 절 연구목적

기후변화로 인한 폭우 재해의 증가로 국지적인 지역에서 많은 비가 내리는 폭우 양상이 증가하고 있고, 이로 인해 폭우회복력에 대한 연구의 중요성이 높아지고 있는 상황에서, 본 연구의 목적은 서울시를 대상으로 폭우회복력지수를 산출하고 이를 기반으로 폭우회복력의 공간적 패턴을 파악하는 것이다. 또한 분석을 통해 도출한 서울시 내 710개 격자의 폭우회복력 점수와 실제로 집계된 폭우 피해의 규모 및 빈도를 종합적으로 고려하여 폭우회복력 수준에 따른 폭우 대응 방안의 근거를 마련하고자 한다. 이를 위하여 건물과 인프라가 밀집한 서울시를 대상으로 1km x 1km 격자 공간 단위로 폭우회복력지수를 산출하였다. 이 지수는 기후변화와 폭우 재해에 대한 취약성과 피해에 대한 적응능력을 종합하여 폭우회복력을 평가하는데 사용될 수 있다. 또한 산출된 폭우회복력지수를 기반으로 서울시 내에서 폭우회복력이 높은 핫스팟 지역과 폭우회복력이 낮은 콜드스팟 지역을 식별하여 폭우회복력의 공간적 패턴을 파악하고 지역 군집을 이해하고자 한다. 마지막으로 데이터를 구축할 수 있는 최근 3년간의 자료를 활용하여 서울시의 1km 격자 단위 폭우회복력지수와 폭우피해액, 폭우기간을 종합적으로 분석하고, 이를 3차원 그래프로 시각

화하여 상황에 따른 분석 결과와 해석을 제시하고자 한다.

본 연구 결과는 미시적인 격자 단위에서 폭우회복력지수의 공간적 분포와 패턴을 이해하는 데 유용하며, 도시계획과 재난 대응 등의 의사결정 과정에서 효과적인 정책을 수립하기 위한 근거 자료로 활용될 수 있다. 또한, 환경부나 기타 관련 기관에서 폭우 피해 방지 사업의 시행 지역을 선정하거나 사업 효과의 예상 범위를 고려하는 데에도 연구 결과가 유용한 자료로 사용될 것으로 기대된다.

연구의 분석 단위는 1km x 1km 격자 단위로 설정하였다. 격자 데이터는 250m, 500m, 1km 등 다양한 크기로 존재할 수 있으나 대부분의 도시 계획이나 재난 대응 정책에 있어서 1km 격자 단위의 공간적 정보가 활용되고 있다는 점에서 1km 격자 단위는 데이터의 효율적인 활용과 연산 비용, 정책 수립에 필요한 공간적 정보를 종합적으로 고려한 최적의 분석 단위로 판단된다. 격자는 지리적으로 균일한 크기와 형태를 가지고 있어 지역 간 비교와 분석에 용이할 뿐만 아니라, 격자 단위로 폭우 피해 상황을 관리하고 모니터링 시스템을 구축할 수 있다는 장점이 있어 국소적인 지역 단위의 기후회복력을 진단 및 평가, 관리하는 데 유용하며 재난 관리와 대응에 있어서 구체적이고 효과적인 정책 수립을 용이하게 한다는 장점이 있다.

제 3 절 선행연구 검토

기후회복력(Climate Resilience)과 관련된 이전 연구들의 논의는 기후변화와 관련하여 '회복력'을 어떻게 정의 내릴지에 대한 것에서부터 출발한다. 경제학에서는 회복력이 일종의 탄력성(Elasticity) 개념으로 사용되는 경우가 많은데, 기후변화와 관련하여 특히 수문학 분야에서 탄력성 개념이 주로 사용되었다. 박재범 외(2021)는 기후변화에 따른 지류 하천의 시공간적 기온-수질 탄성도 영향을 평가하였다. 이 논문에서는 낙동강의 주요 지류를 대상으로 기온과 수질 자료를 이용하여 탄성도를 산정함으로써 기온에 대한 수질의 민감도 분석을 수행한 것이다. Tian 외

(2018)는 기후변화의 수문학적 영향을 평가하기 위해서 기후탄력성(Climate Elasticity) 개념의 중요성을 강조하였다. 수문학 이외의 분야에서는 회복력(Resilience) 개념을 이상기온, 폭염, 폭우 등 기후변화와 관련하여 분석한 연구가 다수이다. 최영웅(2016)은 기후변화 취약계층 이용시설의 기후회복력 강화 방안 마련을 주제로 한 연구에서 기후회복력을 기후변화로 인한 영향에 대응하는 개념으로 정의하였으며 기후회복력에 대한 개념은 각 분야의 의견과 활동을 반영하기 때문에 명확하지는 않지만 기후변화 대응능력, 회복 능력, 개선 능력을 특성을 하는 개념으로 판단하였다. 이는 곧 기후변화에 대한 적응, 저감, 재조직 능력 등으로 정의할 수 있다.

한편 기후변화와 관련하여 회복력을 정량적으로 분석한 사례로서 박한나 외(2015)는 회복탄력성 비용지수를 산출하여 서울시 풍수해를 대상으로 회복탄력성 주요 영향 요인을 분석하였으며, 이 때 회복탄력성 비용지수는 1인당 피해액과 복구액의 합으로 산출하였다. 손민우 외(2011)는 기후변화 요소를 반영하여 홍수 취약성 지표를 개발하고 이를 북한강 유역의 6개 중권역에 대해 적용한 연구를 수행하였으며 서세교(2022) 외는 국내 17개 시·도를 대상으로 침수피해에 따른 재해 회복력지수를 산출하였다. 이와 같이 기후회복력을 정량화 한 선행연구는 일부 지자체나 하천 유역, 행정구역 단위로 분석을 수행하였으나 1km x 1km 격자와 같이 보다 미시적인 단위에서 기후회복력을 분석한 사례는 없었다.

해외 선행연구에서는 격자를 활용한 기후 회복력, 취약성 등을 분석한 사례가 존재한다. Price et. al(2012)은 영국과 웨일스 지역의 홍수 예측을 위해 격자 기반의 모델을 구현하였는데, 해당 모델을 실제로 과거에 발생했던 홍수 사례에 적용한 결과 격자 지역 기반 홍수 예측 도구로서 잘 작동한다는 것을 밝혀냈다. 또한 일본 국토교통성(Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, MLIT)이 발표한 일본 홍수 대책 자료에 따르면 격자 단위의 고해상도 관측 자료를 바탕으로 인구, 침수구역 내 자산가치 등을 격자 통계자료로 산출하여 침수 피해액을 산정하고 있음을 알 수 있다. 이처럼 국내에서와 달리 해외에서는 격자 기반

의 통계자료를 구축하고 이를 홍수 예측이나 폭우 피해액 산출 등에 적극적으로 활용함으로써 미시적인 단위의 분석과 정책사업을 추진하는 등의 모습을 파악할 수 있었다.

따라서 본 연구에서와 같이 미시적인 단위에서 폭우회복력지수를 산출한 결과는 기존의 행정구역 경계에 기반을 둔 지수와는 차별화된 시사점을 제공할 것으로 보인다. 각 자치구 경계 내에서도 격자별로 지니는 상이한 수준의 폭우회복력지수를 식별해낼 수 있으며, 유사한 폭우회복력 수준을 나타내는 격자 지역들을 공간분석으로 군집화함으로써 지역별 폭우 대응 정책을 시행하기 위한 군집의 기준을 마련하는 데 기여할 것이다. 또한 한 도시 내에서 폭우의 영향을 가장 크게 받을 가능성이 있는 취약 지역을 식별할 수 있고 경제, 사회, 물리, 행정, 인구 등 영역별 폭우회복력 정보를 제공함으로써 지역별로 폭우에 대한 취약 원인을 면밀하게 파악하는 데 도움을 줄 수 있다. 따라서 이를 바탕으로 미시적인 공간 단위에서 폭우에 대한 개별 지역의 대응능력 수준을 고려함과 동시에 취약한 부분에 대한 경고 및 대응 계획을 수립할 수 있을 것이다.

제 4 절 논문의 구성

본 연구에서는 서울시의 1km x 1km 격자 710개를 대상으로 폭우회복력지수를 산출하고 공간분석을 수행하여 연구의 시사점을 도출하고자 한다. 제 2장에서는 먼저 기후회복력의 개념을 정의하고 유사한 개념 간 관계를 정립한다. 제 3장에서는 서울시 710개의 격자에 대해 폭우회복력지수를 산출하는 방법과 공간분석 방법을 포함하여 본 연구의 분석 방법에 대해 기술하였다. 제 4장에서는 연구의 결과를 크게 격자 단위 폭우회복력지수 산출 결과, 폭우회복력지수 기반의 공간분석 결과, 폭우회복력지수-폭우피해 규모 빛 빈도 간 관계에 기반한 결과 해석으로 나누어 설명하며, 제 5장에서는 본 연구의 결과에 대한 요약 및 결론을 서술하였다.

제 2 장 기후회복력의 정의

제 1 절 기후회복력(Climate Resilience)의 개념

회복력(Resilience)이란 '되돌아가려는 것(to jump back)'이라는 뜻의 라틴어 "resi-lire"에서 비롯된 것으로 어떠한 대상이나 물질이 외생적 충격으로부터 저항하거나 원상태로 되돌아올 수 있는 능력으로 해석된다. 김동현 외(2015)에 따르면 회복력은 물리학자가 처음 사용한 개념으로서 재난이나 재해 등 외부 충격이 주어졌을 때 물질의 안전성과 저항능력을 기술하는 데 사용되었으나 최근에는 공학, 심리학, 생태학 등 다양한 분야로 그 개념의 적용이 확대되었다. 심리학에서 회복력은 자기복원적(self-righting)인 활동을 표현하며 생태학에서 회복력은 생태계의 교란요인으로 인해 생태계가 와해되는 것을 견뎌내는 능력을 의미한다. 사회체제 하에서 회복력은 미래를 예측하고 계획하는 역량이 추가되기도 한다. 한편 재난 발생에 따른 회복력은 '재난 발생으로 인한 피해를 흡수하고 복구할 수 있는 역량'으로 정의될 수 있으며 지역 차원에서는 '재난으로 인한 지역의 피해영향을 최소화하고 손상된 지역을 복구하는데 필요한 노력을 최소화하는 지역의 역량'으로 회복력을 정의할 수 있다. 이와 같이 다양한 분야에서 사용되는 회복력의 개념을 종합해보면, 결국 회복력이란 외부의 충격이 발생했을 때 원상태로 되돌아오거나 충격에 저항할 수 있는 능력으로서 해석할 수 있다. 다만 회복력을 고려하는 공간적 영역과 회복의 대상 및 범위 등에 따라 회복력을 해석하는 관점의 차이가 존재한다. 학계에서는 회복력을 크게 공학기술적 회복력(Engineering Resilience)과 생태학적 회복력(Ecological Resilience)으로 구분한다. 공학기술적 회복력은 시스템이나 조직이 외부 충격이 발생하기 이전의 원상태로 돌아갈 수 있는 속도를 중요시하며, 회복의 효율성에 초점을 둔다. 즉 공학기술적 회복력 개념은 신속하게 원래의 균형상태로 되돌아가는 것으로서 정의되에 따라 항상성, 예측가능성의 의미가 내재된 것으로 볼 수 있다. 반면 생태학적 회복력은 비록 회복의 효율성

을 극대화하지는 못하더라도 큰 충격이나 교란에 대해 기존의 기능이 지속될 수 있는 유동적 체계와 과정에 초점을 둔다. 따라서 회복의 과정에서 시스템이 재조직되며, 이 때 기존의 구조와 기능, 정체성에는 어느정도 변화가 수반될 수밖에 없다는 사실을 강조한다. 이에 따라 시스템이 충격을 완전히 흡수할 수 없을 경우 충격 이전의 균형상태로 되돌아가는 것이 아니라 그보다 덜 양호한 상태인 대안적 균형상태로서 변할 수 있음을 내포한다. 한편 본 연구에서 다루고자 하는 기후회복력(Climate Resilience)이란 폭염, 폭우, 이상고온 등 기후변화에 따른 해수면 상승 혹은 기상 이변으로 발생할 수 있는 재난에 대비하여 그 이전의 상태로 되돌아갈 수 있는 능력을 말한다. 기후 충격에 대한 회복력은 인간을 비롯한 생물이나 물리적 시스템이 반응하는 정도뿐만 아니라 인프라, 경제성 등을 비롯한 사회 전반의 사회경제적 시스템이 이에 대응하는 적응능력을 모두 포괄하는 개념으로 설명할 수 있으며 이때 회복력은 공학기술적 회복력이 아닌 생태학적 회복력 관점에 보다 부합한 것으로 볼 수 있다.

제 2 절 회복력(Resilience)의 유관개념

1. 취약성(Vulnerability)

취약성(Vulnerability)이란 특정 위험 상황에서 야기되는 손해의 범위를 뜻하거나 사회, 인구, 생태계, 지역 등이 기후변화의 역효과에 민감한 정도, 또는 대처할 수 없는 정도를 의미한다. 회복력이 물리학 분야에서 처음 사용된 것에 반해 취약성 개념은 1970년대 재해와 관련된 논의에서 포함된 것이 시초였다. 김동현 외(2015)에 따르면 발전, 복지 경제학에서 시작된 취약성의 개념은 농촌 개발과 관련된 논의에서 대중화되었으며, 이후 취약성은 단순히 부의 결핍이 아닌 물리적, 경제적, 정치적, 사회적 요인의 복합적인 범주로서 논의되기 시작했다. IPCC는 취약성을 한 시템에 있어서 민감도와 적응능력의 함수로 정의하면서 생물, 물리적 시스템이 기후변화에 반응하는 정도와 사회경제적 시스템이 이에 대응하는 적응능력을 포괄하는 개념으로 설명하였다. 한편 취약성은 인구의 측면

에서 특정한 집단과 관련되는 논의로서 사람에 초점을 맞추는 것이며, 회복력은 도시나 지역의 측면에서 논의되는 것으로 특정 공간 내 인프라가 사람을 보호해줄 수 있는지에 초점을 두기도 한다. 회복력과의 연관성을 고려했을 때 취약성은 회복력과 서로 정-부의 관계로서 논의되는 경우도 있으나 이러한 관점의 경우 회복력과 취약성의 근본적인 차이를 제공하지 못하며, 다른 하나가 증가하면 다른 하나는 동일한 수준만큼 감소하는 관계이다. 또 다른 관점에서는 취약성을 회복력 개념에 포함되는 하나의 인자로 볼 수 있다.

2. 적응능력(Adaptive Capacity)

적응능력은 독립적인 개념으로 사용되기보다 회복력 혹은 취약성과 함께 논의되는 경우가 많다. 회복력과 관련된 논의에서 적응능력은 어떠한 대상에 외부 충격이 발생했을 때 개선되는 상태, 즉 회복의 과정에 있어서 중요한 역할로 강조되는데 이는 충격에 대한 적응의 대응책을 이행하고 촉진하며 준비하고 계획할 수 있는 능력을 의미한다. 적응능력은 회복력있는 도시(resilient city)의 필수적인 결정요인이기도 하며 기후변화에 대한 대응 수단인 부, 기술, 기반시설, 정보, 지식과 기술, 평등, 사회적 자본 등을 포괄한다. 취약성과 관련된 논의에서 적응능력은 기후변화 적응정책을 수립하는 과정에서 취약성을 구성하는 주요 요소로 설명될 수 있다. IPCC는 적응능력을 시스템이 기후변화의 잠재적 피해를 완화시키고 기회를 이용하여 결과에 대처하기 위해 조절하는 능력으로 정의내리며 이를 취약성에 영향을 미치는 하나의 인자로 설정한다.

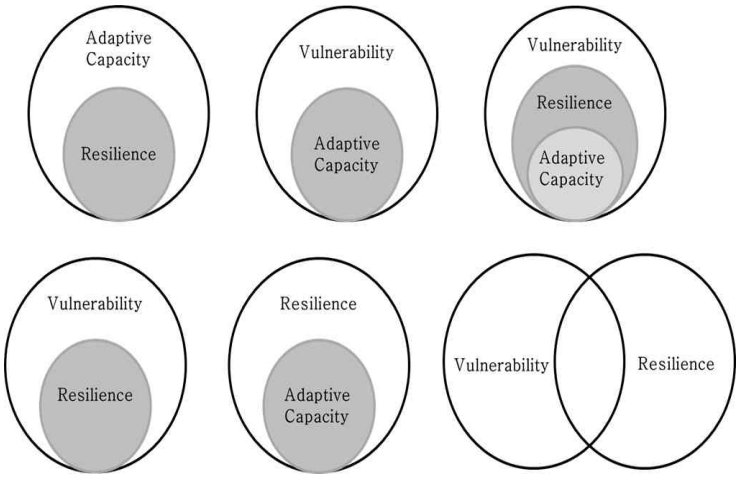
3. 회복력, 취약성, 적응능력의 관계

상기한 회복력, 취약성, 적응능력의 개념에 대해서는 아직 명확한 정의가 없기 때문에 세 개념 간 관계는 상이하게 설정될 수 있다. 김동현 외(2016)는 도시 기후회복력의 측정은 회복력을 확대하고 취약성을 저감시키기 위한 정책 구성을 포함하며, 이는 도시가 지닌 적응 및 대응 역량과 연계될 수 있다고 주장한다. 이제연(2015)에 따르면, 회복력과 취약성

은 개념적으로 연관되어있으나 두 개념 간의 관계는 정반대이거나 서로 밀접한 관계를 형성하고 있어 명확한 관계를 정립하기에는 어렵다.

한편 Cutter 외(2008)는 지역사회 수준에서 재해 회복력의 비교 평가 방법을 개선하기 위한 프레임워크를 제시하면서 기존의 논의들을 바탕으로 회복력, 취약성, 적응능력 간 관계를 다양한 유형으로 제시한 바 있다. Cutter 외(2008)에 따르면 전 세계적인 기후변화 측면에서 위 개념들 간 관계를 정립할 때는 회복력을 적응능력의 핵심 요소로 보는 경우, 적응능력을 취약성의 주요 구성 요소로 보는 경우, 취약성의 구조 내에서 회복력과 적응능력을 중첩된 개념으로 보는 경우 등이 존재한다. 반면 특정 재해를 분석하는 관점에서 회복력의 정의와 유사 개념 간 관계는 보다 세부적으로 다루어진다. 예를 들어, 회복력은 특정 재해 사건에 대처하는 능력으로 정의되면서 취약성 내에 내포될 수 있으며, 회복력 내에 적응능력을 내포시키는 경우도 있다. 또한 취약성과 회복력을 같은 위계로 보고 두 개념 간 교집합이 존재한다고 보는 관점도 있다.

<그림 1> 회복력, 취약성, 적응능력 개념 간 관계



자료: Cutter 외(2008)

회복력, 취약성 및 적응 능력에 대한 개념을 종합해볼 때, 각각의 개념은 서로 배타적이거나 또는 근본적으로 완전히 동일한 개념으로 볼 수는

없다. 또한 회복력을 발휘하는 주체로서 지역이나 조직, 시스템 등은 외부 충격으로부터 회복하기 위하여 취약성이라는 성질을 감내하고 적응능력을 발휘한다는 점에서, 회복력을 취약성보다 더 포괄적인 개념으로 보고 적응 능력은 별개이지만 연결된 개념으로 보는 관점은 합당하다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 폭우회복력의 구성 요소를 폭우 취약성과 폭우 적응능력이라는 두 축으로 설정하고 폭우회복력을 산출하고자 한다.

제 3 장 분석자료 및 분석방법

제 1 절 분석자료

본 연구는 폭우를 포함한 기후회복력, 취약성 등에 관한 연구를 수행한 김동현 외(2015, 2016), 강유진 외(2021), 서세교 외(2022), 손민우 외(2011), 유가영 외(2008)의 선행연구를 고찰하여 폭우와 관련된 세부지표들을 선별하였고 이를 바탕으로 폭우회복력지수를 산출하였다. 분석에 활용한 자료는 국토지리정보원에서 제공하는 서울 지역의 격자단위 인구수(총인구, 유아인구, 유소년인구, 고령인구), 가장 가까운 안전 및 생활·복지 인프라까지의 거리(응급의료시설 ,소방서, 노인여가복지시설), 건물 개수 및 면적(주거용도 면적, 지하층 수, 20년 이상 노후건물 수) 통계자료를 활용하였다.

한편 비격자 형태로 제공되는 행정구역 경계 기반의 자료는 별도의 격자화 과정을 거쳤다. 공공데이터포털에서 제공하는 위치주소로서 서울시 응급실, 보건소, 주요 공원, 녹지대, 옥상녹화, 사회복지시설, 서울시 도시계획시설(방재시설[1])의 위치정보 데이터를 수집하였다. 위치 기반의 데이터는 포인트 좌표로 변환한 후 해당 위치로부터 거리가 멀어질수록 낮은 값을 부여하는 방식으로 격자 공간에 나타내었다.

이 외에 1인당 지방세액, 재정자립도, 사회복지예산비중은 행정 예산의 집행 단위가 시나 군 단위의 지방정부라는 점을 감안하였다. 즉 행정적인 부분은 1km X 1km 격자별로 차이가 존재하지 않으므로 통계청에서 제공하는 서울시 자치구별 데이터를 활용하였다. 또한 1인당 GRDP는 자치구별로 상이하게 나타난 1인당 GRDP 값에 각 격자의 종사자수를 곱함으로써 격자별 GRDP를 산출하였다.

---

1) 서울시 도시계획포털에서 원자료를 제공하며 방재시설은 국토의 계획 및 이용에 관한 법률에 의한 것으로서 하천, 방풍설비, 방화설비, 사방설비, 방조설비 등이 포함된다.

<표 1> 폭우회복력지수 산출을 위한 세부지표

구분	변수	V/C	변수설명	단위
경제 (Economic)	GRDP(억원)	C	(자치구별 GRDP) x (해당 자치구 내 격자별 종사자 수)	격자
	재정자립도(%)	C	지방 재정의 건전성을 나타내는 지표로 (지방세+세외수입) ÷ (자치단체예산규모) ×100	자치구
	1인당 지방세액(억원)	C	지방세액÷주민등록 인구 수	자치구
사회 (Social)	응급의료시설 (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	
	노인 여가복지시설 (km)	C	격자(1km×1km) 중심점으로부터 가장 가까운 노인 여가복지시설까지 도로 이동거리	
물리 (Physical)	주요공원(점수)	V	서울시 내 주요공원 위치	
	녹지대(점수)	V	서울시 내 녹지대 공간정보	
	방재시설	C	서울시 방재시설 현황정보	
	노후건축물 수(개)	V	원천자료 국토교통부 제공	
	옥상녹화(점수)	C	서울시 옥상녹화사업 공간정보	
	지하층 수(층)	V	원천자료 국토교통부 제공	
	토지이용압축도(%)	V	격자 내 토지이용(건물)의 밀도 ((격자 내 건축물 연면적 합 ÷ 격자면적($1km^2$)) × 100%)	
공공·행정 (Governance)	사회복지예산 비중(%)	C	자치구별 일반회계 중 사회복지예산 비중	자치구
	소방서(개)	C	119종합방재전산정보시스템의	격자

			소방서관할 공간정보	
인구 (Population)	주거용도 면적(m^2)	V	원천자료 국토교통부 제공	
	인구밀도 (명/km^2)	V	원천자료 행정안전부 제공	
	고령인구수(명)			
	유소년인구수(명)			
	유아인구수(명)			

주: V는 취약성(Vulnerability), C는 적응능력(Adaptive Capacity)을 의미함.
자료: 국토정보플랫폼 국토정보맵, 공공데이터포털, KOSIS

세부지표들은 특성이 유사한 변수들을 그룹화하여 경제, 사회, 물리, 공공·행정, 인구 다섯 가지 분야로 구분하였다. 경제 영역에는 GRDP, 재정자립도, 1인당 지방세액 지표가 포함되고, 사회 영역에는 응급의료시설 접근성, 응급실, 보건소, 노인여가복지시설 접근성 지표가 포함된다. 물리 영역에는 주요 공원, 녹지대, 방재시설, 노후건축물 수, 옥상녹화, 지하층수, 토지이용압축도가 포함되고 공공·행정 영역에는 사회복지예산 비중, 소방서가 포함된다. 마지막으로 인구 영역에는 주거용도 면적, 인구밀도, 고령인구, 유소년인구, 유아인구 수 지표가 포함된다. 분석 자료의 기초통계량은 <표 2>와 같다.

<표 2> 세부지표의 기초통계량

구분	변수명	Min	Max	Mean	Std.
경제력 (Economic)	grdp(억원)	0	317490	518	22142
	financial_ind(%)	15.8	54.70	28.79	12.89
	local_tax(십억원)	0.242	131.8718	22.1924	25.7519
사회 (Social)	emergency(km)	0.0	74.22	11.54	8.15
	hospital(점수)	0.0	3.00	2.25	1.19
	health_center(점수)	0.0	3.00	0.78	1.13

	welfare_old(km)	0.0	75.47	9.02	6.73
물리 (Physical)	park(점수)	0.0	3.00	2.19	1.15
	greenbelt(점수)	0.0	1.00	0.63	0.48
	prevention(점수)	0.0	3.00	2.39	1.07
	old_building(개)	0.0	4102.00	571.60	694.55
	rooftop(점수)	0.0	1.00	0.33	0.47
	base_floor(층)	0.0	3.17	0.96	0.51
	land_density(%)	0.0	1560.55	322.38	305.04
공공·행정 (Governance)	welfare_budget(%)	36.0	63.90	48.94	6.66
	fire_station(개)	0.0	62.52	7.71	5.71
인구 (Population)	pop(m^2)	0.0	45859.00	13627.31	12804.91
	resid_area(m^2)	0.0	1118.78	147.69	112.46
	old(명)	0.0	8493.00	2386.65	2302.85
	child(명)	0.0	6212.00	1290.81	1310.33
	infant(명)	0.0	3075.00	565.65	572.09

한편 서울시 격자 단위의 폭우회복력지수와 폭우피해액 간 관계를 통한 유형화를 시도하기 위하여 서울시에서 제공하는 침수흔적도 자료를 바탕으로 서울시 전체에 대해 집계된 폭우 피해액을 격자 단위로 배분하였다. 침수흔적도란 태풍·호우·해일 등 풍수해로 인한 피해지역의 침수흔적을 조사하여 과거의 침수피해 상황을 데이터로 구축해 연혁별로 기록한 자료를 뜻한다.

본 연구에서는 폭우가 발생한 최근 연도 중 침수흔적도와 함께 폭우피해액이 집계되고 폭우회복력지수 산출을 위한 세부지표 데이터가 존재하는 2020년을 주요 분석 대상으로 삼았다. 다만 폭우회복력 수준과 폭우피해의 규모 및 빈도 간 관계를 파악하기 위하여 3개년(2018~2020년)의 폭우회복력지수와 폭우피해액(규모), 폭우기간(빈도) 자료를 활용하였다.

제 2 절 분석방법

1. 폭우회복력지수 산출

본 연구에서 확립한 기후 회복력 개념에 의거하여 선정된 21개 세부지표들을 회복력의 결정 요인인 취약성(Vulnerability) 및 적응능력(Adaptive Capacity)으로 구분하였다. 이를 위해 '폭우'의 정량화된 변수로서 폭우피해액을 기준으로 설정하고 21개 세부지표가 폭우피해액에 대해 지니는 상관성을 피어슨 상관관계 분석(Pearson's correlation analysis)으로 파악하였다. 이후 폭우회복력지수 산출에 사용되는 21개 세부지표들의 가중치를 산출하고자 엔트로피 기법을 적용하였다. 엔트로피 기법은 다양한 지표 간의 상대적 중요도를 평가하는 데에 사용되며 지표들 간의 분산과 정보량을 고려하여 가중치를 결정하는 방법이다. 먼저 각 세부지표의 값들을 정규화하여 동일한 척도로 맞춘 후, 엔트로피 기법을 적용하여 각 세부지표의 정보량을 계산하고 상대적 중요도를 산출하였다. 엔트로피 기법을 적용하면 중요도가 높은 지표는 낮은 엔트로피 값을 갖게 되는데 이는 해당 지표가 폭우 회복력에 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다. 가중치 산출을 위한 세부절차는 아래와 같다. 먼저 서울시 내 710개 격자별로 수집한 폭우회복력 관련 세부지표 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($m=1,\cdots,710$), n : 세부지표($n=1,\cdots 21$)

행렬로 구성한 이후에는 세부지표별로 수집한 자료의 단위가 상이하므로 이를 정규화하는 과정이 필요하므로 본 연구에서는 MIN-MAX 방법을 활용하여 데이터를 정규화하였다. 이는 세부지표별로 데이터의 최대

값을 1, 최소값을 0으로 표현되도록 변환함으로써 모든 데이터를 0~1 사이의 수로 정규화하는 방식이다.

$$\text{(순기능 자료)} \quad p_{i,j} = \frac{x_{i,j} - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$
$$\text{(역기능 자료)} \quad p_{i,j} = \frac{\max(x) - x_{i,j}}{\max(x) - \min(x)} \qquad \text{식 (1)}$$

$p_{i,j}$: 각 지표값을 정규화한 값

한편, 본 연구에서는 상기한 바와 같이 세부지표가 폭우 회복력에 미치는 영향을 음(-)의 방향과 양(+)의 방향으로 구분하였다. 회복력에 음의 영향을 미치는 지표들은 취약성(Vulnerability, 이하 V) 지표들로 설정하였으며, 양의 영향을 미치는 지표들은 적응능력(Adaptive capacitiy, 이하 C) 부문의 지표들로 설정하였다. 따라서 회복력에 음(-)의 영향을 주는 지표는 식(1)과 같이 역기능 지표에 대한 표준화 방법을 사용하였으며, 회복력에 양(+)의 영향을 주는 지표는 순기능 지표에 대한 표준화 방법을 사용하였다. 데이터를 정규화 한 이후에는 세부지표별 엔트로피 값(E_j)을 산정하며 엔트로피 값은 지표 값의 분산이 클수록 크게 산정된다.

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

k: 회복력지수 분석의 대상 격자 개수를 고려하기 위한 상수

각 세부지표별로 산정된 엔트로피 값(E_j)을 활용하여 지표 속성 값의 다양성(d_j)을 산정한다. 최종적으로 세부지표별 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.

$$d_j = 1 - E_j \qquad \text{식 (3)}$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j} \qquad \text{식 (4)}$$

각 세부지표별 가중치와 MIN-MAX 방법을 통해 표준화된 데이터 값이 확보되면 가중치가 반영된 지표값들을 합산하여 서울시 1km x 1km 모든 격자 지역의 폭우회복력지수를 산출할 수 있다. 합산한 값 그대로를 사용할 수도 있으나 세부지표의 개수에 따라 값의 크기가 달라질 수 있으므로 다시 한 번 표준화의 과정을 거친다. 이렇게 산출된 값을 폭우회복력지수(Heavy Rainfall Resilience Index)라고 명명하였다.

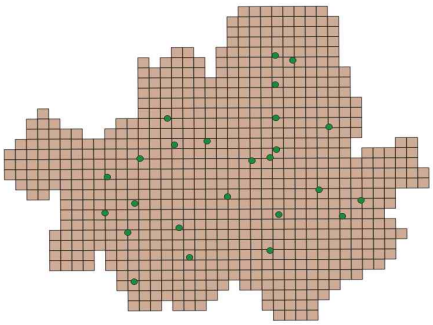
2. 분석자료의 격자화

한편 본 연구는 기존의 행정구역 경계가 아닌 격자 기반 데이터를 활용하였다. 격자데이터는 일정한 모양과 크기를 가진다는 장점이 있으나 행정구역이나 집계구와는 다르게 데이터의 수집단위로는 활용되고 있지 않으므로 격자를 기반으로 통계정보를 표현하기 위해서는 원천데이터의 격자 변환 과정이 필요하다. 기존의 시군구 단위로 제공되는 통계 자료를 격자 단위로 변환하기 위해 GIS 툴을 활용하여 중심점(x, y 좌표) 방식의 지오코딩 기법을 사용하였다. 지오코딩이란 중심점을 대표적인 위치로 선택하여 x와 y 좌표를 할당함으로써 데이터 변환 작업을 수행하는 방식이다.

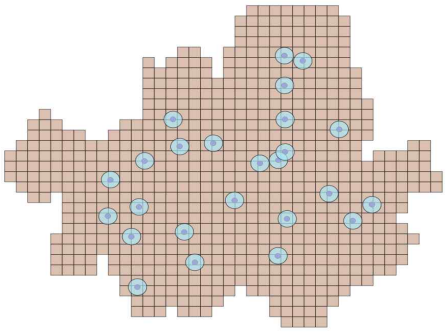
예를 들어 서울시 내에 위치하는 응급실을 기준으로 거리(700m, 1500m)에 따른 차등 점수를 부여한다고 하자. 서울시에 위치한 모든 응급실의 중심점(x, y 좌표)을 추출하여 지도에 포인트 좌표를 표시한 후 해당 포인트 데이터를 기준으로 버퍼를 형성한다. 모든 응급실 포인트의 750m 근방에 해당하는 버퍼를 생성하여 버퍼와 겹치는 격자에 가장 높은 가중치 혹은 점수를 부여한다. 그 다음 동일한 방식으로 응급실 포인트 기준으로 1,500m만큼의 버퍼를 생성한 후 응급실의 1,500m 근방에

위치한 격자들에 더 낮은 가중치나 점수를 부여한다. 이와 같은 중심점(x, y 좌표) 방식의 지오코딩 기법은 시군구 단위 자료를 격자 단위로 변환함으로써 공간 분석이나 모델링 작업을 수행하는 데에 유용하게 사용될 수 있다. 이를 통해 다양한 지리 데이터를 일관된 격자 단위로 표현함으로써, 지역 간 비교나 공간적 패턴 분석 등 다양한 분석 작업을 수행할 수 있다.

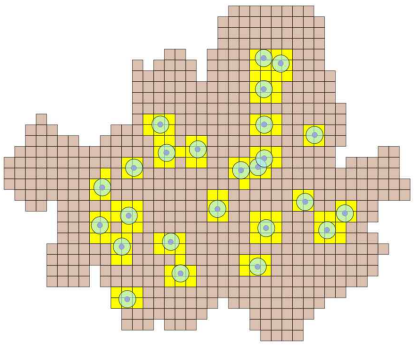
<그림 2> 거리에 따른 차등 점수 부여



- 1단계: 공간정보로 표현하려는 데이터의 위치 좌표(x, y좌표)를 추출한 후 서울시 1km x 1km 단위격자 지도에 포인트 데이터로 표시

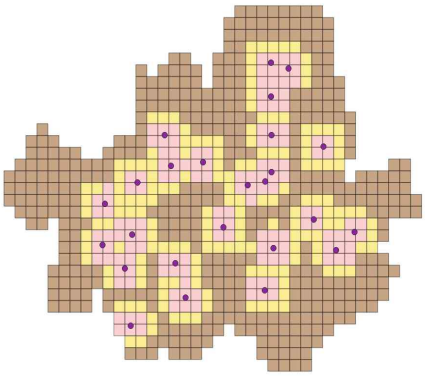


- 2단계: 포인트 데이터를 기준으로 750m 근방에 해당하는 지역에 가장 큰 가중치를 부여하기 위해 반지름이 750m인 버퍼를 그린 후 격자와 중첩 (※ 750m는 도보로 10분 소요 이동거리를 의미함) [2].



- 3단계: 1km x 1km 격자와 포인트 데이터의 750m 근방 버퍼가 중첩되는 부분을 추출하여 가장 큰 가중치를 부여. 본 연구에서는 3점을 부여

2) 이창효 외(2013)에 따르면, 국내 선행연구에서 역세권 설정 기준은 통상적으



- 4단계: 동일한 방법으로 포인트 데이터를 기준으로 1,500m 근방에 해당하는 지역에 두 번째로 큰 가중치인 2점을 부여하고, 이 외 격자는 모두 1점을 부여

자료: 저자 작성

한편 2020년 서울시 전체 폭우피해액을 격자로 배분하기 위해서 개선법에 의한 계산식을 활용하여 격자 자료를 구축하였다. 강유진 외(2019)에 따르면 국내에서 경제성 분석을 위한 홍수 피해 산정은 간편법이 처음 제시되면서 시작되었으며, 간편법은 농작물 피해액을 먼저 산정한 후 나머지 피해 항목들은 해당 지역의 농작물 피해액 경험식에 근거한 비율계수를 적용하여 피해액을 산정한다. 그러나 이는 농경지 피해액, 공공시설 피해액, 기타 피해액, 간접 피해액과 농작물 피해액 사이의 상관관계 규명이 불분명하다는 단점이 있다. 개선법은 간편법을 개선한 모델로서 과거 피해 자료를 통해 유도된 도시유형별 침수면적과 피해액 간 회귀식을 사용하여 폭우 피해액을 집계하는 방식이다. 본 연구는 행정안전부에서 매년 공표하는 재해연보 내의 폭우피해액, 침수면적 등 데이터를 활용하였으므로 데이터 활용 방식의 일관성을 위하여 개선법을 활용한 폭우피해액 계산 방법을 채택하였다. 따라서 행정안전부에서 고시한 자연재해위험개선지구 관리지침에 근거하여 폭우 발생에 따른 건물피해액, 건물내용물 피해액, 농경지 피해액, 농작물 피해액, 산업지역피해율, 인명피해액, 공공시설물 피해액을 개선법 방식으로 산출하는 함수식을 활용하여 서울시 전체 피해액을 침수된 격자로 배분하였다.

로 보행거리 기준 약 500~800m로 설정함. 이는 중심점이라고 할 수 있는 지하철역으로부터 접근성이 가장 높은 거리 범위임.

<표 3> 개선법에 따른 피해항목별 폭우피해액 계산 방법

항목		피해액 계산식
건물피해액		f(침수면적,피해액) 함수식
농경지 피해액		g(침수면적,피해액) 함수식
농작물 피해액		전(답)침수면적×작물단가
산업지역피해율		h(침수면적,피해액) 함수식
인명피해액	인명손실	침수면적×침수면적당손실인명수×원단위
	이재민	침수면적×침수면적당이재민수×평균소득
공공시설물 피해액		항목별 공공시설물(도로, 교량, 하수도...)피해율 × 일반자산피해액(①~⑤)

자료: 행정안전부 자연재해위험개선지구 관리지침 (개정 2018.11.13 행정안전부 고시 제2018-073호)

2020년 서울시 폭우피해액은 건물 피해액과 공공시설물 피해액 항목에서만 집계되었으므로 2020년 침수흔적도를 기반으로 침수된 지역의 침수면적과 평균 침수면적을 활용하여 격자에 대해 피해액을 산출하였다. 건물, 농경지, 공공시설물, 기타 피해액의 경우 「도시유형별 침수면적과 피해액 간 관계식」을 사용하는데 이는 행정안전부 자연재해위험개선지구 관리지침에 의한 피해액 계산식에 따라 산출한다.

3. 공간 분석

한편 각 격자는 지리적으로 구별되므로 특정 격자의 회복력은 다른 격자와 상이할 수 있다. 따라서 지리적 차이점을 고려한 폭우회복력지수를 활용한 공간 분석은 특정 격자나 군집의 취약성, 대응 능력을 식별하는데 유용하다. 이에 따라 서울시 내 격자 단위 폭우 회복력 지수에 대해서 국지적 모란지수와 전역적 모란 지수를 분석하였다. 전역적 모란지수(Global Moran's Index)는 전역적 공간연관성을 측정하는 데 가장 널리 활용되는 측도로서, 주변 지역 간의 유사성이나 상호 의존성을 평가하여 공간적 군집 패턴이나 분산 패턴을 검증하는 데 쓰인다(식 5).

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

n은 분석단위인 격자의 개수, x_i와 x_j는 분석단위 i와 j의 폭우회복력지수, $\overline{x}$는 각 격자가 갖는 폭우회복력지수의 평균, W_{ij}는 공간가중치행렬을 의미한다. 모란지수는 -1부터 +1까지의 값을 가지며 양(+)의 값(0에서 1 사이)은 공간적 클러스터링이 존재함을 나타내며 공간적 자기상관성이 양의 관계를 가짐을 뜻한다. 음(-)의 값은 값들이 서로 다른 패턴이나 군집으로 분산되어 있음을 의미하며, 공간적 자기상관성은 음의 상관관계를 가진다. 값이 0일 경우는 공간적 자기상관성이 존재하지 않는다.

그러나 전역적 모란지수는 전체 대상지역인 서울시에 대하여 공간연관성을 하나의 값으로 보여줄 수 있지만, 이를 통해서는 각 격자 간 공간연관성의 국지적 패턴을 파악할 수 없다는 한계가 있다. 전역적 모란지수의 한계를 극복하기 위한 공간분석 방법은 국지적 연관성 지수(Local Indicators of Spatial Association)의 일종인 국지적 모란지수(Local Moran's I)를 산출하는 것이다. 국지적 모란지수 또한 전역적 모란지수와 마찬가지로 -1에서 +1까지의 값을 가지며 식 (6)과 같이 각 분석단위(격자)가 가지는 폭우회복력지수의 Z-score에 기초하여 산출된다.

$$I_i = Z_i \sum_j W_{ij} Z_j \qquad \text{식 (6)}$$

$Z_i = \frac{(x_i - \overline{x})}{\delta}$이고, δ는 x_i의 표준편차를 의미한다. 산출된 결과 값에 따라 HH, LL, HL, LH 유형으로 분류되는데(<표 5>), 그 중 HH 유형은

높은 속성 값을 가진 격자들이 집중되어있는 지역으로 핫스팟(Hot Spot)을 의미하고, LL 유형은 낮은 속성 값을 지닌 격자들이 집중되어있는 콜드스팟(Cold Spot)을 나타낸다.

<표 4> 국지적 공간연관성의 유형

유형	설명
HH	평균 이상의 폭우회복력지수 값을 지닌 격자가 평균 이상의 폭우회복력지수 값을 지닌 격자와 인접하고있는 경우(제 1사분면)
LL	평균 미만의 폭우회복력지수 값을 지닌 격자가 평균 미만의 폭우회복력지수 값을 지닌 격자와 인접하고있는 경우(제 3사분면)
HL	평균 이상의 폭우회복력지수 값을 지닌 격자가 평균 미만의 폭우회복력지수 값을 지닌 격자와 인접한 경우(제 2사분면)
LH	평균 미만의 폭우회복력지수 값을 지닌 격자가 평균 이상의 폭우회복력지수 값을 지닌 격자와 인접한 경우 (제 4사분면)

격자별로 산출한 폭우회복력지수를 바탕으로 공간분석을 수행하여 폭우회복력지수가 높은 Hot Spot 군집과 폭우회복력지수가 낮은 Cold Spot 군집을 식별할 수 있다. 각 군집에 해당하는 격자들의 폭우회복력지수를 바탕으로 군집단위와 군집 내 격자 단위에서 폭우회복력지수-폭우피해액 간 관계를 파악하고자 사분면 분석을 시행하였다. 사분면 x축을 폭우회복력지수, y축을 폭우피해액으로 두고 폭우회복력과 폭우피해액 간 관계를 파악할 수 있다.

제 4 장 분석결과

제 1 절 서울시 격자 단위 폭우회복력지수

각각의 21개 세부지표들이 폭우회복력에 대해 가지는 방향성을 분석하였다. 이를 위해 폭우를 정량화한 변수로서 폭우피해액을 기준으로 설정했을 때 21개 세부지표가 폭우피해액에 대해 가지는 상관성을 피어슨 상관관계 분석(Pearson's correlation analysis)[3]을 통해 파악하였다. 폭우피해액에 대해 양(+)의 상관관계를 가지는 지표를 취약성(Vulnerability, 이하 V) 측면의 지표로 분류하였으며 음(-)의 상관관계를 가지는 지표는 적응능력(Adaptive Capacity, 이하 C) 측면의 지표로 분류하였다.

폭우피해액과 음(-)의 상관관계를 가지고 있어 폭우회복력에 대한 적응능력(C) 지표에 해당하는 것은 GRDP(-0.01), 재정자립도(-0.01), 1인당 지방세액(-0.01), 응급의료시설접근성(-0.02), 보건소(-0.03), 방재시설(-0.09), 소방서(-0.02)인 것으로 나타났다. 추가적으로 응급실, 옥상녹화, 사회복지예산비중이 폭우피해액과 가지는 상관계수의 절대값은 각각 0.03, 0.06, 0.00001로 나타나 통계적으로 폭우 피해액과 유의미한 상관관계는 없는 것으로 나타났으나 해당 지표들은 모두 폭우 재해 발생 시 의료시설, 강우 수집 및 저장 시설, 인명 보호 및 지원의 원천 등으로 활용되어 적응능력 측면에서 그 중요성을 지니고 있다. 따라서 응급실, 옥상녹화, 사회복지예산비중 지표 또한 취약성(V)이 아닌 적응능력(C) 측면의 지표로 분류하였고 이 외 나머지 지표들인 공원(0.03), 녹지대(0.03), 노후건축물 수(0.00), 지하층 수(0.01), 토지이용압축도(0.08), 주거용도 면적(0.03), 인구밀도(0.09), 고령인구(0.08), 유소년인구(0.13), 유아인구 수(0.14)는 취약성(V) 측면의 지표로 분류하였다.

폭우회복력에 대한 방향성(V/C)을 고려한 뒤, 경제력, 사회, 물리, 공

3) 피어슨 상관계수는 코시-슈바르츠 부등식에 의해 -1부터 +1 사이의 값을 가지며 +1은 완벽한 양(+)의 선형 관계를, -1은 완벽한 음(-)의 상관관계를 의미한다.

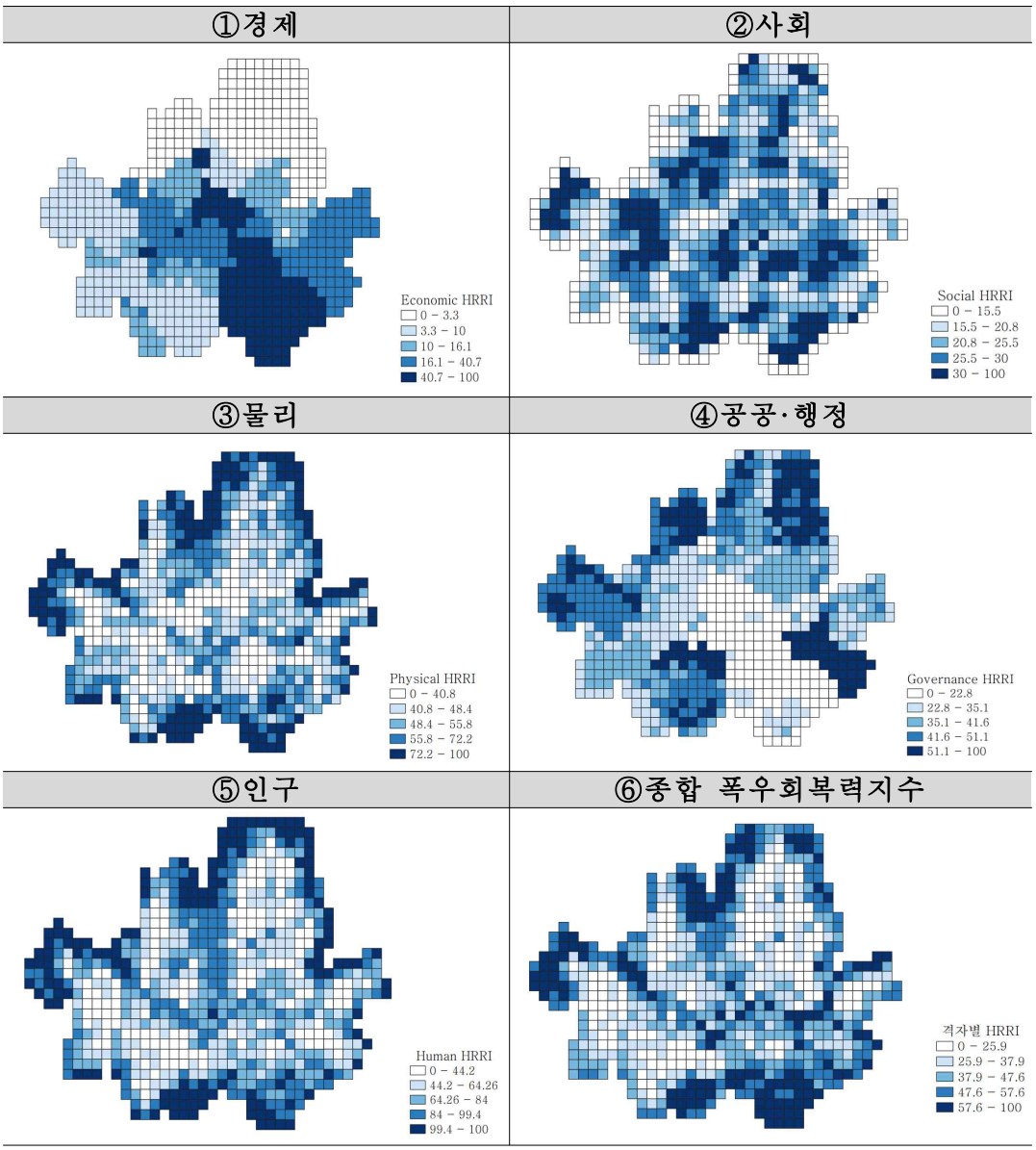
공·행정, 인구 5가지 영역으로 구분한 21개 세부지표에 대하여 도출한 엔트로피 가중치는 <표 5>와 같다.

<표 5> 세부지표별 엔트로피 가중치

영역	V/C	세부지표명	엔트로피 가중치	
경제	C	grdp	0.00381	0.38%
	C	financial_ind	0.07048	7.05%
	C	local_tax	0.07157	7.16%
사회	C	emergency	0.08622	8.62%
	C	hospital	0.00927	0.93%
	C	health_center	0.02177	2.18%
	C	welfare_old	0.07576	7.58%
물리	V	park	0.02214	2.21%
	V	greenbelt	0.02159	2.16%
	C	prevention	0.01276	1.28%
	V	old_building	0.03349	3.35%
	C	rooftop	0.01478	1.48%
	V	base_floor	0.07937	7.94%
	V	land_density	0.05079	5.08%
공공·행정	C	welfare_budget	0.09953	9.95%
	C	fire_station	0.07727	7.73%
인구	V	pop	0.06076	6.08%
	V	resid_area	0.03583	3.58%
	V	old	0.05855	5.86%
	V	child	0.04885	4.88%
	V	infant	0.04542	4.54%

이후 각 세부지표의 값에 <표 5>의 지표별 가중치를 곱하여 영역별 폭우회복력지수와 종합 폭우회복력지수를 산출하였다(<그림 3>). 다만 경제 영역에서는 행정 예산의 집행 단위가 지자체 단위라는 점을 고려하여 1인당 지방세액, 재정자립도 지표의 경우 격자 데이터가 아닌 지자체 단위의 자료를 사용하였다. 이러한 이유로 <그림 3>의 경제 영역 폭우회복력수준 지도에서 보이는 바와 폭우회복력 지수 간 차이가 서울시 자치구 경계와 유사하다는 점을 알 수 있다. 이 외 사회, 물리, 공공·행정, 인구 영역에서는 비교적 격자별로 상이한 폭우회복력지수가 산출되었다.

<그림 3 > 서울시 격자 단위 폭우회복력지수 지도(영역별·종합)



서울시 710개 격자의 영역별 및 종합 폭우회복력지수는 Min-Max 표준화를 통해 최솟값이 0, 최대값이 100점인 점수 체계로 환산되었으며, 기초통계는 <표 6>과 같다. 영역별 폭우회복력지수의 평균값은 경제 영역이 22.6점, 사회 영역 22.3점, 물리 영역 55.5점, 공공·행정 영역이 38.2점, 인구 영역이 70.1로 나타났다. 종합 폭우회복력지수의 평균값은 42.0점으로 나타났다.

<표 6> 격자단위 폭우회복력지수의 기초통계

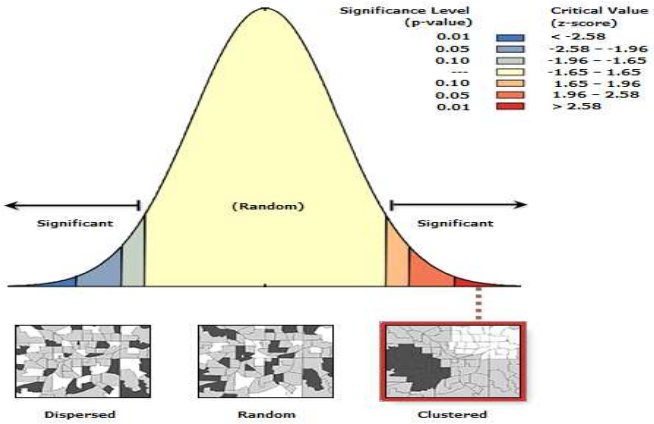
영역	Min	Max	Mean	Std.
경제	0.0	100.0	22.6	25.5
사회	0.0	100.0	22.3	10.2
물리	0.0	100.0	55.5	17.6
공공·행정	0.0	100.0	38.2	18.7
인구	0.0	100.0	70.1	26.6
종합	0.0	100.0	42.0	16.7

710개 격자 중 평균 이상의 폭우회복력 수준을 보이는 격자는 365개, 평균 이하의 폭우회복력 수준을 보이는 격자는 345개로 나타났는데 평균 이상의 폭우회복력 수준을 지니는 격자들은 공통적으로 인구와 물리 영역의 점수가 높게 나타났다. 이는 해당 격자들이 다른 격자 지역에 비해 주거용도 면적, 고령인구, 유아 인구, 인구밀도 등이 적고 이로 인해 노후 건축물 수, 지하층 수, 토지이용 압축도 등 물리적 측면의 지표값 또한 작게 나타나 폭우 피해에 취약한 인구나 시설의 밀집도가 낮기 때문인 것으로 판단된다. 반면 평균 이하의 폭우회복력 수준을 지니는 격자는 경제, 사회, 물리, 공공·행정, 인구 영역 전반에 있어서 상대적으로 낮은 점수로 집계되었다. 세부지표 상으로는 인구밀도와 취약인구 수, 노후 건축물 수, 지하층 수, 토지이용 압축도가 높으며 응급의료시설이나 보건소 등 생활 및 안전시설과의 거리가 비교적 먼 것으로 나타났다.

제 2 절 폭우회복력지수를 활용한 공간분석

서울시 격자단위 폭우회복력지수를 활용하여 산출한 전역적 모란지수(Global Moran's Index) 값은 0.676이며, 유의확률(P-value)은 0.000으로 귀무가설을 기각하여 공간적 자기상관성이 존재하는 것으로 나타났다. 따라서 전체 분석 범위인 서울시 전체 지역은 폭우회복력지수에 대해 양(+)의 공간적 자기상관성을 갖는 것으로 나타났다. 이는 특정한 값을 지니는 격자의 근방에 해당 격자와 유사한 값을 지니는 또 다른 격자가 존재함을 의미한다.

<그림 4> 서울시 폭우회복력지수의 공간적 자기상관성

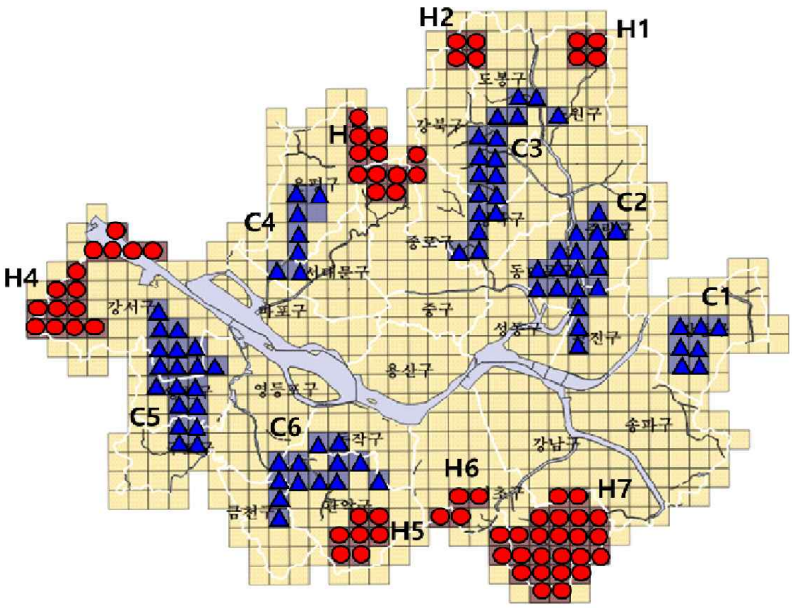


전역적 모란지수는 유사한 값들의 전반적인 군집경향성을 보여주는 지표로서 서울시 전체 지역에 대하여 폭우회복력지수가 가지는 공간적 자기상관성의 존재 여부를 확인할 수 있다. 그러나 각 격자들이 공간적 자기상관성을 어떠한 군집형태로 나타내고 있는지 파악하기 어려운 한계가 있다. 따라서 국지적 모란지수(Local Moran's Index)를 산출함으로써 보다 개별적인 범위에서 서울시 내 격자들 간의 자기상관성 여부와 군집패턴을 파악하였다.

공간적 자기상관성 값이 존재하는 격자 간에 유사한 값을 지닐 경우 클러스터를 형성하며 속성값별로 지역이 분류되는데 <그림 5>와 같이 핫스팟은 빨간색 격자로, 콜드스팟은 파란색 격자로 도출된다. 본 연구에서는 핫스팟 분석 결과를 지도상에 시각화하여 패턴을 파악한 후 핫스팟 또는 콜드스팟으로 분류된 격자가 비슷한 성격의 이웃격자와 맞닿아 있거나 대각선에 위치한 경우 하나의 군집으로 분류하였다. 그 결과 서울시 내 위치한 격자들의 평균 수준보다 높은 폭우회복력지수를 지니는 군집 7개(H1~H7)와 그보다 낮은 폭우회복력지수를 지니는 군집 6개(C1~C6)를 도출하였다. 각 군집과 시군구 경계를 비교해본 결과 폭우회복력지수가 높은 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 나타난다.

폭우회복력지수가 낮은 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(<그림 5>).

<그림 5> 서울시 격자 단위 폭우회복력지수 기반 군집 유형



주: ●(동그라미) 표시는 폭우회복력지수가 상대적으로 높은 핫스팟 군집 내 격자, ▲(세모) 표시는 폭우회복력지수가 상대적으로 낮은 콜드스팟 군집 내 격자를 의미함.

폭우회복력지수가 높은 핫스팟 군집의 경우 영역별 점수는 경제 23.7점, 사회 29.1점, 물리 80.2점, 공공 및 행정 45.8점, 인구 98.2점으로 나타난 반면 폭우회복력지수가 낮은 콜드스팟 군집의 경우 영역별 점수는 경제 8.6점, 사회 21.7점, 물리 40.5점, 공공 및 행정 39.6점, 인구 32.4점으로 나타났다. 5가지 영역 중 특히 경제, 물리, 인구 영역은 핫스팟 군집 여부에 따라 점수의 편차가 크다(<표 7>).

<표 7> 군집유형별(H,C)-영역별 폭우회복력지수

H/C	경제	사회	물리	공공·행정	인구	종합
H	23.7	29.1	80.2	45.8	98.2	66.5
C	8.6	21.7	40.5	39.6	32.4	17.8

핫스팟과 콜드스팟 유형에 해당하는 총 13개 군집에 대하여 폭우에 대한 영역별 회복력 지수를 정리한 표는 <표 8>과 같다. 예를 들어 H1 군집의 경우 해당 군집에 속하는 격자를 추출한 후 해당 격자들이 가지는 영역별 회복력지수 값의 평균을 구해 H1 군집의 회복력지수 값을 계산하였다. 그 결과 핫스팟 군집에 해당하는 H1~H7 군집은 60점대의 종합 폭우회복력지수를 지니는 반면 콜드스팟 군집에 해당하는 C1~C6 군집의 종합 폭우회복력 지수는 최저 10.2점, 최대 22.4점, 평균은 17.8점에 불과한 것으로 나타났다.

<표 8> 군집별(H1~H7, C1~C6)-영역별 폭우회복력지수

구분	군집	해당 격자	관련 자치구	군집 내 격자들의 평균값					
				경제	사회	물리	공공·행정	인구	종합
Hot Spot 군집	H1	다사 6264~6265, 6364~6365	노원구	0.0	33.2	82.2	66.8	98.8	67.7
	H2	다사 5664~5665, 5764~5765	강북구, 도봉구	1.6	29.0	86.5	52.0	99.9	64.5
	H3	다사 5158~5161, 5257~5260,5357~5358 ,5458~5459	은평구, 종로구, 강북구	13.6	26.3	83.5	47.3	98.4	64.1
	H4	다사 3550~3551,3650~3652, 3750~3753,3850,3854 ~3855 다사 3954~3955,4054, 4154	강서구	10.0	35.4	80.6	56.8	99.5	68.3
	H5	다사	관악구	4.8	33.9	87.7	52.2	99.7	67.4

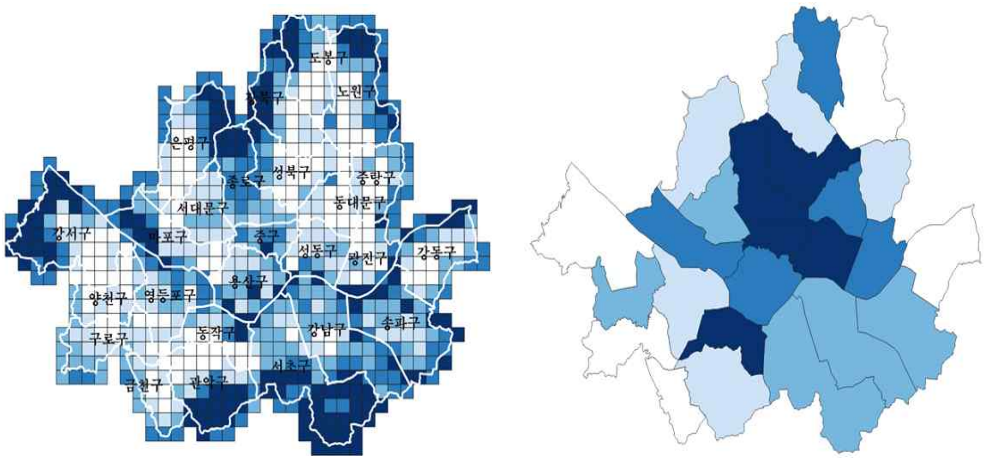
		5038~5039,5138~5140,5239~5240							
	H6	다사 5540,5640~41, 5741	서초구	67.6	23.4	67.5	23.2	94.9	65.5
	H7	다사 5838~5839,5937~5939,6036~6040,6136~6141,6237~6241, 6338~6340	서초구, 강남구	68.3	22.8	73.3	22.2	96.4	67.8
Cold Spot 군집	C1	다사 6748~6750, 6848~6850,6950	강동구	18.1	16.8	34.4	34.2	19.7	10.2
	C2	다사 6052~6053,6152~6154,6249,6251~6255, 6350,6352~6356,6455	동대문구, 중랑구, 광진구	7.4	22.5	44.3	36.7	42.9	22.4
	C3	다사 5654,5754~5760, 5856~5861,5961~5962,6062,6161	노원구, 도봉구, 강북구, 성북구, 종로구	2.1	24.4	41.5	39.0	34.7	17.9
	C4	다사 4753,4853~4857, 4956~4957	은평구, 서대문구	8.4	24.1	40.9	41.3	26.2	16.6
	C5	다사 4147~4151, 4244~4250, 4344~4349, 4448	양천구, 구로구, 강서구	10.0	19.5	39.4	42.1	33.6	18.3
	C6	다사 4740~4743, 4842~4843,4942~4944,5042~5044,5143, 5242	관악구	5.6	23.1	42.6	44.4	37.4	21.5

주: '다사'는 서울지역의 국가지점번호에 해당하는 한글 문자 2자임.

격자 단위로 산출한 폭우회복력지수는 기존 행정구역 경계 기반의 폭우회복력 지수와 차별화된 결과와 시사점을 제공한다. 격자 단위 폭우회복력지수의 핫스팟 공간분석으로 도출된 총 13개 군집(H유형 군집 7개, C유형 군집 6개)을 시군구 단위의 폭우회복력 지수와 비교하면 하나의

자치구 경계 안에서도 격자별로는 폭우회복력지수가 상이한 것을 볼 수 있다(<그림 6>). 예를 들어 시군구 단위 폭우회복력지수를 산출하면 관악구 지역은 하나의 통일된 폭우회복력지수 값을 나타내지만 격자 단위로 폭우회복력지수를 산출한 후 공간분석을 수행한 결과 관악구 내에서도 한 군집은 폭우회복력지수가 서울시 내 격자의 평균 수준을 상회하고 또 다른 한 군집은 폭우회복력지수가 서울시 내 격자의 평균 수준보다 낮게 나타났다.

<그림 6> 서울시 격자 및 시군구 단위의 폭우회복력지수



제 3 절 폭우회복력지수와 피해규모·빈도 간 관계

본 연구에서 산출한 서울시 격자별 폭우회복력지수를 실제 통계로 집계된 폭우피해액 자료와 비교함으로써 폭우에 대한 회복력 수준이 피해액과 어떠한 연관성이 있는지 살펴보고자 한다.

통계연보 자료에 따르면 2020년 서울시 전체에서 집계된 폭우피해액[4]은 약 6억 5천만 원이며 이 값을 각 연도의 1km x 1km 침수 격자에 배분하였다. 그 결과 서울시 전체 710개 격자 중 160개의 격자가 '침수 격자'로 분류되었다. 침수 피해가 집계된 군집의 폭우피해액이 서울시 전체 폭우피해액에 대해 자치하는 비중을 살펴보면, 핫스팟 군집에서 H1, H4 군집은 각각 0.01%, 0.05% 비중을 차지하였으며 콜드스팟 군집은 C1(96.72%), C3(0.06%), C2(0.04%), C6(003%) 순으로 폭우피해액이 높게 나타났다. 따라서 폭우회복력지수 고값을 지닌 클러스터들의 폭우피해액은 전체 피해액 대비 0.09%에 불과하지만 폭우회복력지수 저값을 지닌 클러스터들의 폭우피해액은 전체 피해액의 96.86%에 해당하여 대부분의 폭우피해가 폭우회복력이 낮은 격자들에 밀집하여 발생했음을 알 수 있다.

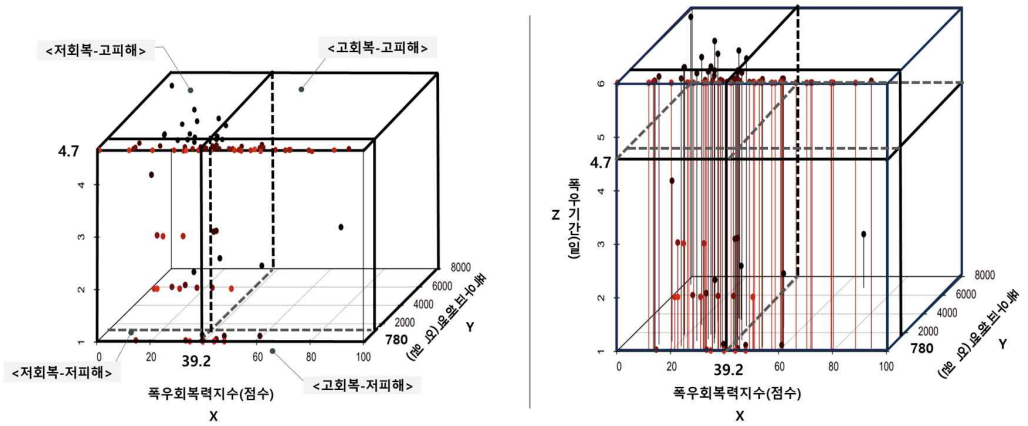
<표 9> 폭우회복력지수 Hot/Cold Spot 군집의 폭우피해액

Hot Spot			Cold Spot		
군집명	피해액 (천원)	서울 전체 폭우피해액 대비 비중	군집명	피해액 (천원)	서울 전체 폭우피해액 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	-	-			
합계	0.09%		합계	96.86%	

4) 폭우피해액 항목 중 인명피해는 제외하였음. 인명피해가 발생한 정확한 지점을 파악할 수 없어 인명피해 데이터를 격자 단위로 구축할 수 없기 때문임.따라서 본 연구에서 폭우피해액의 범위는 인명피해를 제외한 물질적 피해로 한정함.

한편 폭우회복력지수와 폭우피해액 간 관계를 더욱 정확하게 파악하고자 격자 단위로 데이터 구축이 가능한 가장 최근 3개년(2018~2020)의 폭우회복력지수와 폭우피해액을 산출하였다. 한편 폭우가 내리는 기간(빈도)을 동시에 고려함으로써 회복력지수와 피해액 간의 관계만으로 설명되지 않는 사례들에 대한 설명을 추가하였다. 이를 위하여 2018~2020년 3개년의 침수된 격자들을 대상으로 폭우회복력지수와 폭우피해액, 폭우기간을 산출하고 이를 3차원 그래프로 시각화하였다. 이후 침수 격자들의 종합 폭우회복력지수를 x축 변수, 폭우피해액을 y축 변수, 폭우기간을 z축 변수로 설정하여 각 격자의 좌표를 표시하였다(<그림 7>). 각 축에 해당하는 중심선은 침수된 격자들의 폭우회복력지수 평균값, 폭우 피해액(규모)의 평균값, 폭우 기간(빈도)의 평균값이다.

<그림 7> 2018년 폭우회복력지수-폭우피해액-폭우기간

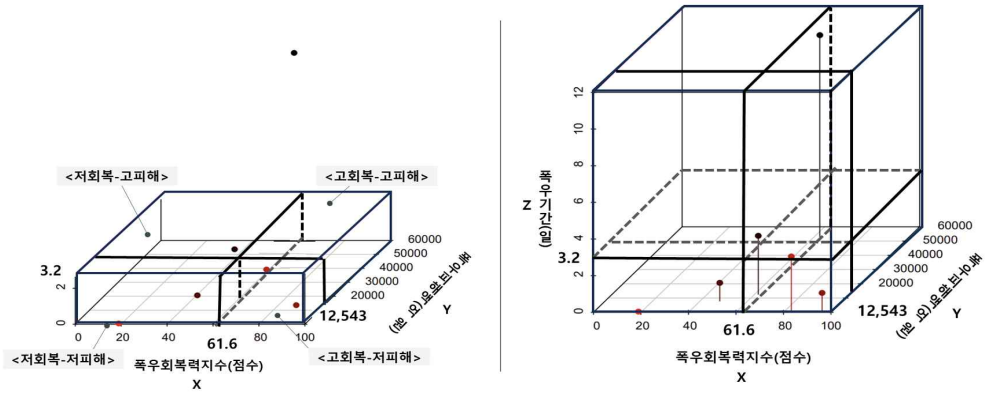


주: 2018년 침수된 격자의 폭우회복력지수 평균값은 39.2점, 폭우피해액 평균값은 780억원, 평균 폭우기간은 4.7일임.

2018년의 경우, <그림 7>의 왼쪽 그림과 같이 각 축의 평균값을 기준으로 폭우회복력지수가 낮고 피해액이 높은 '저회복-고피해' 영역과 회복력지수가 높고 폭우피해액이 낮은 <고회복-저피해> 영역이 나타나 폭우회복력지수 낮을수록 상대적으로 폭우피해액이 크다는 관계를 파악

할 수 있다. 그러나 폭우 회복력이 높음에도 불구하고 폭우피해액이 높게 집계된 일부 격자들이 <고회복-고피해> 영역에 위치함을 알 수 있다. 3차원 그래프를 통해서 폭우회복력지수와 폭우피해액, 폭우기간 간 관계를 살펴보면 사분면 분석에서 <고회복-고피해> 영역에 속했던 격자들의 폭우기간이 평균 폭우기간(4.7일)을 훨씬 상회하는 것을 알 수 있다. 즉 폭우회복력 수준이 상대적으로 높더라도 폭우 기간에 따라 폭우피해액이 증가할 수 있음을 보여준다.

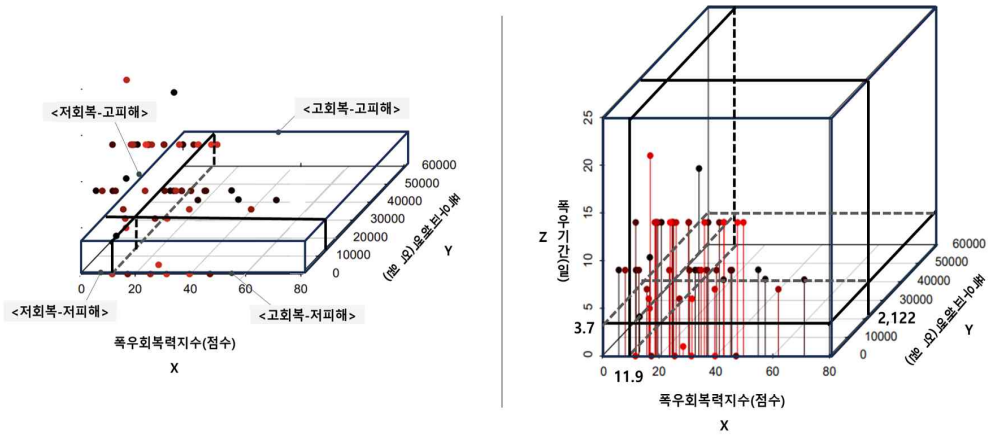
<그림 8> 2019년 폭우회복력지수-폭우피해액-폭우기간



주: 2019년 침수된 격자의 폭우회복력지수 평균값은 61.6점, 폭우피해액 평균값은 12,543억원, 평균 폭우기간은 3.2일임.

2019년의 경우, 침수된 격자가 많지는 않지만 <그림 8>의 왼쪽 그림과 같이 사분면을 통해 폭우회복력지수와 폭우피해액 간 관계를 살펴보면 <저회복-고피해> 영역과 <고회복-저피해> 영역에 대부분의 침수 격자가 위치한다. 그러나 한 개의 침수격자는 <고회복-고피해> 영역에 위치하며 폭우피해액의 규모는 다른 격자들에 비해 매우 크게 나타났다. 3차원 그래프를 통해서 폭우회복력지수와 폭우피해액, 폭우기간 간 관계를 살펴보면 사분면 분석에서 <고회복-고피해> 영역에 속한 격자는 폭우기간이 평균 폭우기간(3.2일)을 크게 상회하는 12일인 것으로 나타났다.

<그림 9> 2020년 폭우회복력지수-폭우피해액-폭우기간



주: 2020년 침수된 격자의 폭우회복력지수 평균값은 11.9점, 폭우피해액 평균값은 2,122억원, 평균 폭우기간은 3.7일임.

2020년의 경우, <그림 9>의 왼쪽 그림과 같이 사분면을 통해 폭우회복력지수와 폭우피해액 간 관계를 살펴보면 폭우회복력지수가 낮고 피해액이 높은 <저회복-고피해> 영역에 다수 격자가 위치한다. 또한 3차원 그래프를 통해서 폭우회복력지수와 폭우피해액, 폭우기간 간 관계를 살펴보면 사분면 분석에서 <고회복-고피해> 영역에 속했던 격자들의 폭우기간이 평균 폭우기간(3.7일)을 상회하는 것을 알 수 있다. 다시 말해, 폭우회복력 수준이 상대적으로 높음에도 불구하고 폭우 기간이 길어짐에 따라 폭우피해액이 증가하는 양상을 보인다.

이러한 결과는 분석적 측면과 정책적 측면에서 시사점을 제공한다. 먼저 분석적 측면에서는 폭우회복력지수를 산출함에 있어서 과거에 발생한 폭우 양상이나 예상되는 폭우 기간 등의 자료를 바탕으로 폭우의 기간을 반영할 수 있는 지표를 추가적으로 고려할 필요가 있다. 본 연구에서 산출한 폭우회복력지수는 각 격자가 지니고 있는 폭우의 대응능력과 취약성을 내포하고 있지만 격자별로 폭우라는 외부 충격이 지속되는 기간이 상이하다는 사실은 반영하지 못한다 따라서 추후 후속연구에서는 예상되는 폭우 기간이나 과거의 평균 폭우 기간 등을 고려한 폭우회복력지수를 산출하여 회복력지수와 폭우피해액 간 관계를 더욱 명확하게 파악할 수 있을 것으로 사료된다. 정책적 측면에서는 폭우 발생에 따른 피해를 줄이기 위해서 폭우 기간이 길어질 것에 대비한 정책이 함께 필요하다는

시사점을 제공한다. 본 연구의 분석 결과를 통해 폭우회복력지수가 낮은 지역일수록 폭우피해액이 높게 나타난다는 사실을 파악할 수 있었으나, 폭우회복력 수준이 높음에도 불구하고 폭우 기간이 길어짐에 따라 폭우 피해액이 큰 폭으로 증가할 수 있다는 사실을 밝혀냈다. 따라서 폭우회복력 수준이 다른 지역에 비해 높은 지역일지라도 폭우의 기간이 길 것으로 예상되거나, 과거에 발생하였던 폭우 기간이 평균적으로 길었다면 장기간 폭우에 따른 피해를 대비할 필요가 있다.

또한 서울시 1km x 1km 격자 단위의 폭우회복력지수를 산출하여 침수 격자들을 분석한 결과 다음과 같은 시사점을 도출할 수 있다. 먼저 격자라는 미시적 공간 단위에서 폭우회복력 지수를 산출하고 공간 분석을 시행한 분석은 구체적이고 개별적인 지역별로 폭우회복력 수준을 진단할 수 있다는 장점이 있으며, 회복력지수 산출에 활용한 영역(경제, 사회, 물리, 공공·행정, 인구)별 혹은 폭우 관련 세부지표의 특성(취약성, 적응능력)별로 진단할 수 있다는 장점이 있다. 특히 격자 단위 폭우회복력지수를 대상으로 공간 분석을 수행하면 단순히 시군구 단위가 아니라 폭우 재해에 대해 각 지역이 지니고 있는 본질적인 성격에 기반한 군집을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 실제로 분석 결과 관악구와 같이 하나의 자치구 내에 폭우회복력 지수가 낮은 콜드스팟과 폭우회복력지수가 높은 핫스팟이 공존하는 바를 확인할 수 있는 것처럼 각 지역이 지닌 폭우회복력을 보다 정확하게 진단할 수 있다. 또한 하나의 폭우회복력 군집이 두 개 이상의 자치구에 걸쳐있는 경우, 자치구나 지자체 간 협업의 필요성을 뒷받침하는 근거가 될 수 있다.

한편 실제로 환경부에서는 올해 5월 '여름철 자연재난 대책기간(5월 15일~10월 15일)'에 맞추어 홍수피해 방지 대책을 발표하였는데, 그 내용은 정확하고 신속한 홍수 예보를 하기 위해 일부 지역에 도시침수예보를 시범운영하며 홍수 정보 제공 지점을 구체화한다는 내용이다. 이는 최근 들어 기상이변이 빈번하게 발생하고 있으며 2022년 8월 집중호우와 9월 '힌남노' 내습 시 500년 빈도 이상의 강우가 발생해 큰 폭우 피해가 집계되었기 때문이다. 당시에는 30명의 인명피해와 약 5,728억 원의 재산피해

가 집계되었으며 이에 따라 폭우 피해에 대한 단계적, 구체적인 피해 방지 대책 마련이 촉구되었다. 이에 환경부는 폭우 피해 방지 대책의 일환으로 과학기술정보통신부와 협력하여 2024년까지 도시침수예보를 여러 지역으로 확대하고 2025년부터는 인공지능 홍수예보를 전국 223개 지점에서 시행할 예정이다. 또한 국민들이 폭우 위험을 보다 잘 인지하고 대응할 수 있도록 정보의 내용을 보다 구체적으로 제공하고자 기존엔 '관심·주의' 등으로만 제공하던 폭우 정보를 '둔치 주차장 침수' 등과 같이 구체화한다고 발표한 바 있다.

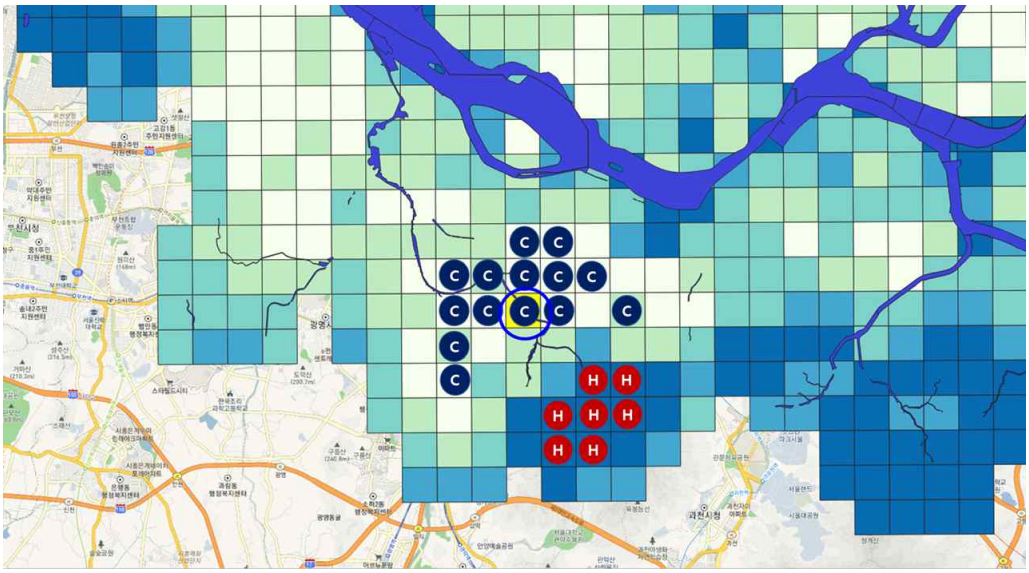
이와 같이 정부 차원에서 '주요 도시별 맞춤형 대책(특정 하천유역 치수계획)'을 수립할 것을 발표한 상황에서 개별적인 지역이 폭우라는 자연재해에 대해 가지고 있는 고유한 특성에 기반하여 폭우 방지 및 예보 정책을 펼치는 것은 매우 중요할 것으로 판단된다. 1km x 1km 격자 단위로 폭우회복력지수를 산출하고 공간 분석을 수행한 본 연구의 결과는 폭우 피해를 방지하기 위해 현 시점에서 정부가 추진하는 사업들뿐만 아니라 추후 시행하게 될 사업 및 정책을 수립하는 의사결정 과정에서 중요한 근거자료로 활용될 수 있다.

예를 들어, 2023년 환경부가 도시침수예보 사업의 시범 운영 지역으로 지정한 도림천 유역 중 상습적인 침수가 발생하는 관악구 구간(별빛내린천(도림천)[5]은 연구에서 활용한 '다사 4942 '격자에 해당하는데 이 격자는 핫스팟 분석에서 폭우회복력지수가 낮은 Cold Spot인 C6 군집으로 분류되는 격자이다(<그림 10>). 만약 해당 격자에 위치한 도림천 구간을 도시침수예보 사업의 시범 운영 지역으로 설정했다면 침수예보 지역을 C6 군집에 속하는 격자들까지로 확대 설정하는 방안을 고려할 수 있다. 또한 도시침수예보 운영 지역을 확대하고자한다면 사업 지역을 선정하는 과정에서 1km x 1km 격자와 같이 미시적인 수준에서 폭우회복력 수준을 진단하고, 정책의 효과를 효율적으로 파악할 수 있는 대상지역과 대상 범위를 선정하는 것이 필요할 것으로 보인다. 추후 사업의 보완점을

5) 이승열, 시정일보, "관악구, '침수피해 종합대책 TF' 출범", 2022. 09. 24. http://www.sijung.co.kr(검색일: 2023.06.06.)

진단하고 그 해결책을 마련할 때에도 해당 지역이 폭우회복력 측면에서 가지고 있는 특성들을 고려하여 사업 내용을 보완해나갈 수 있을 것이다.

<그림 10> 2023년 도시침수예보 시범운영 지역과 폭우회복력 군집



본 연구는 과거에 발생한 폭우 피해, 침수 흔적 자료, 격자 지역별 데이터를 활용하여 사전적인 성격의 폭우회복력지수를 산출했다는 점에서 연구 의의가 있으며 기존 선행연구들의 폭우회복력 분석 단위가 시군구 수준이라는 점을 고려할 때 1km x 1km 격자라는 미시적인 공간 단위에서 폭우회복력을 분석했다는 점에서 차별성을 지닌다. 폭우 피해 방지 정책을 수행할 때 사업 적용이 우선적으로 필요한 지역을 대상지로 선정해야 한다는 점에서 단순히 행정구역에 따른 폭우회복력 평가를 넘어서서 미시적인 단위의 폭우회복력을 진단하고 공간 분석을 시행한 것은 추후에도 폭우 재해에 대비한 지역별 맞춤형 대책을 수립할 때 반드시 고려되어야 할 부분이다. 이러한 연구의 차별성과 기여도 있지만, 한계점과 함께 후속 연구과제도 남는다. 먼저 연구의 공간적 분석 단위가 서울시에 한정되어있으며 다양한 재해 중 폭우에 대한 회복력만을 다루고 있다는 한계가 존재한다. 또한 격자 데이터 구축의 어려움으로 폭우회복력지

수를 산출할 수 있는 분석 기간이 길지 않다는 한계가 있다. 폭우회복력지수와 폭우피해액, 폭우기간 간의 관계를 파악한 결과 폭우회복력지수와 별개로 폭우가 내리는 기간에 따라서도 폭우 피해의 영향이 달라지는 것으로 나타났다. 따라서 후속 연구에서는 폭우회복력지수 산출에 있어서 폭우기간을 고려할 수 있는 세부지표를 포함시킬 필요가 있다.

또한 본 연구에서는 연 단위의 자료를 활용하였으나 폭우 재해의 양상이 시간에 따라 점차 다양해지고 빈도가 잦아지고 있으므로 지수 산출에 사용되는 세부지표들의 시간적 수집 단위도 보다 짧은 단위로 고려될 필요가 있다. 예를 들어 노후 건축물의 경우 기존에는 건축물의 노후 여부를 판별하는 기준이 20년이었으나 2022년 발표된 도시 및 주거환경정비조례 개정안에 의하여 30년으로 시행될 예정이다. 이는 최근 도심지 지역의 폭우 피해로 공동주택의 거주자들이 인명 및 재산 피해를 입게 되었기 때문에 폭우 피해 방지 차원의 정책인 것으로 보인다. 이처럼 폭우회복력지수의 세부 지표에 해당하는 자료들 또한 폭우 피해의 증가에 따라 측정 및 판별 기준 등이 달라질 가능성이 높기 때문에 세부지표들의 주기적 업데이트도 수반되어야 한다. 그 외에도 격자 단위 폭우회복력지수를 분석하는 지역을 서울시 외 다른 지역에 적용해볼 수 있을 것이며, 폭우 재해 이외에 폭염, 가뭄 등 다른 기후재해나 기상요인들 대상으로 동일한 방식의 분석을 적용해볼 수 있다.

제 5 장 요약 및 결론

본 연구는 미시적인 분석 단위에서 폭우회복력 수준을 진단하고 폭우회복력을 바탕으로 한 공간적 특성을 파악하기 위한 시도로써 서울시 지역의 1km x 1km 격자 710개에 대하여 경제, 사회, 물리, 공공 및 행정, 인구 영역을 포괄하는 종합 폭우회복력지수를 산출하였고 핫스팟 공간분석 기법을 통해 폭우회복력 수준이 높은 Hot Spot 군집, 폭우회복력 수준이 낮은 Cold Spot 군집을 식별하였다. 마지막으로 폭우회복력지수와 폭우피해액 간 관계를 군집 단위와 격자 단위에서 분석하였다. 이 때 분석의 시간적 단위는 데이터 수집 가능 범위 중 서울시의 5개년(2016~2020) 평균 폭우피해액과 가장 유사한 수준을 보이는 2020년으로 설정하였으며, 분석 자료는 국토정보플랫폼, 공공데이터포털, KOSIS를 통해 수집하여 격자로 구축하였다.

격자 단위로 폭우회복력지수를 산출하고 핫스팟 분석을 통해 Hot Spot과 Cold Spot을 식별한 결과 시군구 단위의 분석보다 정밀한 수준으로 폭우 회복력 수준을 진단할 수 있었다. 예를 들어 관악구의 경우, 시군구 단위의 분석에서는 하나의 통일된 폭우회복력지수 값이 산출되지만 격자별로 지수를 산출한 후 군집 분석을 수행한 결과 관악구 내에서도 폭우회복력 수준이 높은 군집인 Hot Spot 군집(H5)과 폭우회복력 수준이 낮은 군집인 Cold Spot(C6) 군집이 공존하는 것으로 나타났으며 폭우회복력지수는 각각 67.4점, 21.5점이었다. 또한 유사한 수준의 폭우회복력지수를 띠는 군집이 두 개 이상의 자치구에 걸쳐 존재하는 경우도 식별되었다. 마지막으로 2020년 서울시 전체 폭우피해액을 2020년 서울시 침수 격자에 배분한 이후 격자별 폭우회복력지수와 폭우피해액 간 관계를 파악할 수 있었다. 서울시 내 710개의 1km x 1km 격자 중 침수된 격자는 160개이며, Hot Spot과 Cold Spot으로 분류된 군집 내 격자 154개 중에서는 총 18개의 격자가 침수 격자로 나타났다. 폭우회복력지수가 높은 Hot Spot 군집 7개 중에서는 H1, H4에서만 폭우피해액이 집계되고 폭우회복력지수가 낮은 Cold Spot 군집 6개 중에서는 C1, C2, C3,

C6 군집에서 폭우피해액이 집계되었다. 폭우회복력지수 고값을 지닌 클러스터들의 폭우피해애은 전체 피해액 대비 0.09%에 불과하지만 낮은 폭우회복력지수 값을 지닌 클러스터들의 폭우피해액은 전체 피해액의 96.86%에 해당하여 대부분의 폭우피해가 폭우회복력이 낮은 공간들에 밀집하여 발생했음을 알 수 있었다. 보다 세부적인 분석을 위해 2018~2020년 기간에 침수된 격자들을 대상으로 폭우회복력지수와 폭우피해액 간 관계를 바탕으로 폭우회복력지수-폭우피해액-폭우기간 간 관계를 3차원 그래프로 시각화하여 살펴보았다. 그 결과 회복력지수가 높으면 피해액이 낮고, 회복력지수가 낮으면 피해액이 상대적으로 높다는 사실을 알 수 있었으나 폭우 기간이 길어지면 폭우회복력이 높더라도 폭우피해액이 크다는 것을 밝혀냈다. 이를 통해 얻을 수 있는 분석적 측면의 시사점은 폭우회복력지수 산출에 있어서 폭우기간을 고려할 수 있는 지표를 추가하는 것이며, 정책적 측면의 시사점은 폭우회복력 수준과 함께 폭우기간을 동시에 고려하여 폭우 피해 방지 대책 및 사업을 시행할 필요가 있다는 것이다.

폭우회복력지수 산출에 있어서 1km x 1km 수준의 고해상도 자료를 구축하고 회복력을 진단한 연구는 각 격자가 폭우에 대해 가지고 있는 취약성, 적응능력 측면의 성질들을 바탕으로 군집을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 이를 통해 폭우회복력 지수가 낮은 격자들이 군집한 클러스터에 대해서는 침수 및 하수도 문제와 관련된 인프라 개선, 추가적인 자금 지원, 기술 및 인력 지원 등 정책을 시행함으로써 폭우 회복력을 증진시키고 폭우 피해를 감소하는 데에 필요한 도움을 제공할 수 있다. 이와 같이 특정 지역 범위를 대상으로 회복력지수가 높거나 낮은 영역을 세분화하여 진단 및 비교할 수 있고 유사한 폭우회복력 수준을 보이는 군집들은 폭우 대응 방안이나 사례 등을 공유하며 폭우 피해에 대한 적절한 대응책을 사용할 수 있을 것이다. 군집 내외 간에는 지속적인 긴밀한 폭우 방지 혹은 피해 모니터링을 통해 군집 간 연계와 협력을 강화할 수 있으며 이는 결국 서울시의 폭우 대응 능력을 전반적으로 향상시키기 위한 근본적인 해결책이 될 수 있다. 이러한 점에서 격자 단위로 폭우회

복력을 진단 및 분석한 본 연구는 기존의 행정구역 경계 기반의 연구와 차별점을 가지며, 고해상도에서 폭우회복력을 보다 정밀하게 분석할 수 있다는 장점을 지닌다. 연구의 결과는 서울시 내 폭우회복력지수의 공간적 분포와 패턴을 이해하는 데에 기여할 것으로 기대되며, 재난 대응과 도시계획에 관련된 결정과정에서 효과적인 정책을 수립하는 데 활용가능한 자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 후속 연구로는 격자 단위 폭우회복력지수를 분석 지역을 서울 이외에 다른 지역으로 확장할 수 있을 것이며 폭우 이외에 폭염, 가뭄 등 다른 기후재해나 기상요인들 대상으로 동일한 방식의 분석을 적용함으로써 기후회복력에 대한 미시 단위의 진단과 공간 분석을 수행할 수 있다.

참 고 문 헌

공공데이터포털, https://www.data.go.kr

국민재난포털, https://www.safekorea.go.kr/idsiSFK/neo/main/main.html

국토교통부 국토지리정보원, https://www.ngii.go.kr/kor/main.do

강유진, 왕원준, 이하늘, 김경탁, 김수전, 김형수. 2021. “격자단위 공간분석자료를 활용한 정량적 홍수피해 평가.” 「한국방재학회 논문집」 21(6): 265-273.

김동현. 2016. “도시의 기후 회복력 확보를 위한 공간단위별 평가체계 및 모형 개발 (Ⅱ).” 「기본연구보고서」 2016: 1-204.

김동현, 송슬기, 이헌영, 강상준, 권태정, 김진오, 홍사흠. 2015. “도시의 기후 회복력 확보를 위한 공간단위별 평가 체계 및 모형 개발 (1).” 「기본연구보고서」 2015: 1-319.

김미경, “5월부터 서울 도림천 ‘침수예보’ 시범 운영...폭우 피해 최소화”, 국제명인저널, 2023년 5월 11일자. http://www.imj.co.kr/news/212681(검색일: 2023년 6월 5일)

박인환, 미티쿠, 성호제, 김형준, 김명환, 황환국, 박문형. 2018. “도심지 홍수예방 연구개발 (smart flood management): Development of urban folld mitigation technology (smart flood management).” 「한국건설기술연구원」 국립중앙도서관 연계자료 (14).

박재범, 갈병석, 김성민. 2021. “기후변화에 따른 지류 하천의 시공간적 기온-수질 탄성도 영향 평가.” 「한국습지학회지」 23(4): 296-306.

박한나, 송재민. 2015. “회복탄력성 비용지수를 활용한 회복탄력성 주요 영향 요인 분석: 서울시 풍수해를 대상으로.” 「국토계획」 50(8): 95-113.

서세교, 장새움. 2022. 지역 침수피해 특성에 따른 재해 회복력 지수 분석. 2. 「한국방재학회 논문집」 22(6): 55-67.

손민우, 성진영, 정은성, & 전경수. 2011. “기후변화를 고려한 홍수취약성

지표의 개발.” 「한국수자원학회논문집」 44(3): 231-248.
유가영, 김인애. 2008. “기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안.” 「기본연구보고서」 2008: 1-97.
이길상, 진대용, 송슬기, 최희선. 2019. “텍스트 분석을 통한 국내 ‘회복력’관련 연구동향: 도시 기후변화 및 재난재해를 중심으로.” 「한국기후변화학회지」 10(4): 401-414.
이세형, 장훈, 노진아. 2011. “수도권 삶의 질 지수 변동에 관한 연구.” 「한국측량학회지」 29(1): 29-37.
이승열, “관악구, ′침수피해 종합대책 TF′ 출범”, 시정일보, 2022년 9월 24일자. http://www.sijung.co.kr(검색일: 2023년 6월 6일)
이제연. 2015. “지방자치단체의 기후재난 회복력 분석.” 「환경농촌」 55: 85-85.
이창효, 장성만, 이승일. 2013. “역사 내 이동거리를 고려한 지하철 도보 역세권 설정 연구.” 「국토계획」 48(3): 235-248.
이충성, 최승안, 심명필, 장준경. 2006. “도시지역과 전원지역의 홍수피해 비교를 통한 홍수피해산정방법의 적정성 평가.” 「국토연구」 21-35.
최연우, 홍유정, 추미진, 윤동근. 2021. “회복력 비용지수를 활용한 지역의 재난 회복력에 영향을 미치는 요인 분석.2.” 「한국방재학회논문집」 21(6): 21-29.
최영웅. 2016. “기후변화 취약계층 이용시설의 기후회복력 강화 방안.”
통계연보. 2018~2020.
환경부 선제적·체계적인 홍수피해 방지대책 발표 (2023.05.10.)
행정안전부 자연재해위험개선지구 관리지침 (개정 2018.11.13 행정안전부 고시 제2018-073호)

Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., Webb, J. .2008. *A place-based model for understanding community resilience to natural disasters*. Global

environmental change.

IPCC

Johnson, C., Blackburn, S. 2014. *Advocacy for urban resilience: UNISDR's making cities resilient campaign*. Environment and Urbanization

Martin, R., Sunley, P. 2015. *On the notion of regional economic resilience: conceptualization and explanation*. Journal of economic geography.

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism(MLIT). 2005. *Flood Management in Japan*

Moran, P. A. 1948. T*he interpretation of statistical maps. Journal of the Royal Statistical Society*. Series B (Methodological).

Paton, D., Smith, L., Violanti, J. 2000. *Disaster response: risk, vulnerability and resilience. Disaster Prevention and Management.* An International Journal.

Price, D., Hudson, K., Boyce, G., Schellekens, J., Moore, R. J., Clark, P., Pilling, C. .2012. *Operational use of a grid-based model for flood forecasting*. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management. Thomas Telford Ltd.

Tian, L., Jin, J., Wu, P., Niu, G. Y. 2018. *Assessment of the effects of climate change on evapotranspiration with an improved elasticity method in a nonhumid area.*

Yoon, D. K., Kang, J. E., Brody, S. D. 2016. *A measurement of community disaster resilience in Korea*. Journal of Environmental Planning and Management.

Abstract

A Study on the Spatial Analysis of Climate Resilience in the Heavy Rainfall : the case of Seoul

Yeongseon Baik
Dept. of Agricultural Economics and Rural Development
The Graduate School
Seoul National University

In recent times, the frequency of localized heavy rainfall disasters has been increasing due to climate change, leading to a growing interest among researchers in climate resilience. Previous studies on heavy rainfall primarily focused on assessing the magnitude and extent of damages, while research of analyzing climate resilience in the heavy rainfall events has been relatively limited. Therefore, this study aimed to evaluate the 1km x 1km grid-based Climate

Resilience for Seoul and examine the spatial characteristics of resilience through hotspot analysis, a form of spatial analysis. In this study, climate resilience was conceptualized as a comprehensive notion that incorporates both vulnerability to climate change and disasters, along with the ability to adapt and mitigate damages. The analysis utilized data from the National Geographic Information Institute, Public Data Portal, and Korea Statistics to incorporate factors such as population, land, infrastructure, and economy. The grid-based Climate Resilience Index was calculated on a scale of 0 to 100. The hotspot analysis results identified high-value clusters of Climate Resilience Index(referred to as Hot Spots) and low-value clusters(referred to as Cold Spots) within Seoul. As a result, seven clusters with high levels of climate resilience and six clusters with low levels of climate resilience were identified in Seoul. Interestingly, cases were found where both high-value and low-value clusters coexisted within the same administrative district, as well as instances where the same type of climate resilience cluster formed in multiple districts. These analytical findings differentiate this study from previous research that relied on administrative boundaries. And they emphasize the capability to evaluate climate resilience at a more detailed spatial level, going beyond district-level analysis. Lastly, for 2018, 2019, and 2020, a 3-dimensional graph was created with three axes: the heavy rain resilience index, the amount of heavy rain damage, and the heavy rain period in the 1km grid unit of Seoul. Considering the level of resilience of heavy rain and the scale and frequency of heavy rain damage comprehensively, the interpretation of the analysis results and the implications of the analytical and policy aspects were presented. The results of this research are expected to contribute to understanding the spatial distribution and patterns of the

Climate Resilience Index in Seoul, serving as valuable evidence for decision-making processes related to disaster response and urban planning. For instance, this study employed a 1km x 1km grid resolution to evaluate the level of climate resilience in the Dorimcheon area. This region was chosen as a test site for urban flood forecasting by the Ministry of Environment in 2023. The analysis revealed that the Dorimcheon area fell into the Cold Spot category, indicating a low Climate Resilience Index based on the findings of the hotspot analysis. Consequently, the findings of this study can be utilized as valuable information in selecting areas for flood prevention projects or considering the expected range of project effectiveness. In order to effectively evaluate the climate resilience of a specific region, it is important to move away from relying solely on administrative boundaries as spatial units. Instead, it is necessary to adopt an approach that clusters and diagnoses resilience, taking into account the distinctive attributes of each area concerning heavy rainfall. By considering the unique characteristics of different regions, a more comprehensive understanding of climate resilience can be achieved. Assessing climate resilience at a micro-scale and conducting spatial analysis are essential when formulating region-specific measures to prepare for heavy rainfall disasters.

keywords : Climate resilience, grid, entropy weighting, spatial analysis, heavy rainfall
Student Number : 2021-28806