

Research Paper

호우 피해액 기반 지역 유형별 특성 연구

김민정 · 성진 · 정주철

부산대학교 도시공학과

Study on Characteristics of Area Types Based on Rainfall Damage Amounts

MinJung Kim · Jin Seong · JuChul Jung

Department of Urban Planning & Engineering, Pusan National University

요약: 최근 기후변화로 인한 집중호우의 빈도와 강도가 증가함에 따라 호우 피해가 심각해지고 있다. 이에 본 연구는 2014~2023년 전국 시·군·구를 대상으로 호우 피해액을 인구·면적·GRDP 기준으로 정규화하여 Z-Score로 표준화하고 이를 통해 지역을 유형화하였다. 이후 세 기준 모두에서 평균을 상회하는 복합 고위험 지역을 선별하여 연도별 누적 피해액 시계열에 Weibull 공식을 적용한 빈도분석을 수행하였다. 분석 결과 4대강 상·중·하류 및 일부 연안·저지대에 고위험 지역이 집중 분포하였으며, 이들 중 대규모·저빈도형과 소규모·고빈도형으로 구분되어 동일한 고위험 지역이라도 재해 양상과 방재 대응 전략이 상이함을 확인하였다. 이러한 규모·빈도 결합의 다차원적 접근은 기존의 단발적 피해 규모 분석의 한계를 극복하며 구조적 치수사업과 생활밀착형 비구조적 대책의 우선순위를 차별화하는 정책적 근거를 제공하고, 향후 기후변화 시대의 재난관리 정책 효율성 제고와 피해 예측 모델 고도화에 기여할 것으로 기대된다.

주요어: 호우 피해액, 지역 유형화, 빈도분석

Abstract: Recent increases in the frequency and intensity of concentrated heavy rainfall due to climate change have exacerbated heavy rainfall damages. Accordingly, this study targeted all cities, counties, and districts nationwide from 2014 to 2023, standardizing heavy rainfall damage amounts based on population, area, and GRDP using Z-Scores to classify regions by damage magnitude. High-risk regions exceeding the average across all three criteria were then selected, and frequency analysis was conducted by applying the Weibull formula to the time series of annual cumulative damage amounts. The analysis revealed that high-risk regions are concentrated in the upper, middle, and lower reaches of the four major river basins as well as some coastal and lowland areas, with these regions further categorized into large-scale low-frequency types and small-scale high-frequency types-demonstrating that even within the same high-risk areas, disaster patterns and required countermeasures differ. This

multidimensional approach combining damage magnitude and frequency overcomes the limitations of conventional single-event damage magnitude analysis, providing policy grounds for differentiating priorities between structural flood control measures and everyday non-structural countermeasures, while contributing to enhanced efficiency in disaster management policies and the advancement of damage prediction models in the era of climate change.

Keywords: Flood Damage Amount, Area Classification, Frequency Analysis

I. 서론

기후변화의 심화로 인해 전세계적으로 극한 강우 및 집중호우의 발생 빈도가 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따른 호우 피해 또한 각국에서 심각한 사회적·경제적 문제로 인식되고 있다(IPCC, 2023). 기존에는 예측이 어려웠던 이상 기후 현상이 이제는 점차 일상화되면서 인명 피해와 더불어 지역 경제, 사회기반시설 등 다양한 분야에 걸친 복합적 피해가 현실로 드러나고 있다. 특히 도시화가 빠르게 진행된 지역일수록 침수 취약성이 높아지는데, 불투수면 확대, 하천 인공화 및 토지 이용 변화 등 공간적 특성이 주요 원인으로 작용한다(Ha & Jung, 2017). 우리나라 또한 최근 수년간 연평균 강수량의 꾸준한 증가와 함께 여름철 국지적 집중호우의 빈도 및 강도 강화가 동반되면서 사회 전체 차원에서 상당한 피해가 발생하고 있다(Park et al., 2023). 주요 대도시 및 인접한 주거·상업지역에서 급격한 침수와 교통 두절, 재산 피해는 물론, 주거 취약계층의 피해가 더욱 집중되는 양상이 빈번하게 나타나고 있다. 또한 과거에 비해 예상치 못한 중소 규모 지역에서의 급격한 피해 사례도 증가하고 있어 기존의 대응 체계로는 이러한 변동성에 효과적으로 대처하는 데 한계가 드러나고 있다. 우리나라 역시 연평균 강수량 증가와 함께 국지적 집중호우의 빈도·강도 강화로 인해 대도시 및 인접 주거·상업지역에서 급격한 침수와 교통 두절, 재산 피해, 취약계층 피해 집중 등이 반복적으로 발생하고 있으며, 예기치 못한 중소 규모 지역에서의 급격한 피해 사례도 늘어나 기존 대응 체계의 한계가 뚜렷이 드러나고 있다(Park et al., 2023). 이러한 상황은 호우 피해를 단순한 재난이 아닌 지역의 구조적·공간적 취약성과 결부된 사회적 위험으로 인식할 필요가 있음을 보여준다. 아울러 이에 대한 체계적인 진단

과 관리 방안의 마련이 요구된다.

그럼에도 불구하고 국내에서는 전국 단위로 호우 피해의 규모와 빈도를 동시에 고려하여 정량적 관계를 분석한 연구가 아직 부족한 실정이다(Park et al., 2011; Kim et al., 2018). 기존 연구들은 특정 구역이나 개별 도시를 대상으로 한 사례 분석에 치우치거나 피해 규모와 발생 빈도를 별도로 다루는 경향이 강하다. 또한 호우 피해 통계는 공간적·시간적 변동성이 크고 매년 자료가 갱신된다는 특성으로 인해 전국 단위에서 피해 규모와 빈도를 결합한 정량적 분석이 충분히 수행되지 못하였다. 그럼에도 불구하고 정기적으로 축적되는 피해 통계를 활용하여 ‘어떤 지역에서, 어느 정도 규모의 피해가, 어느 정도 빈도로 반복되는지’를 체계적으로 파악하는 작업이 필요하다. 이는 단기간의 단발적 사건이 아니라 반복적·구조적으로 취약한 지역을 식별하기 위한 전제 조건이 된다. 피해 규모와 빈도의 관계를 주기적으로 모니터링하고 이를 지역별 공간 특성과 결합하여 분석하는 작업이 필수적이다. 이러한 분석을 통해 기후변화와 도시화에 따른 피해 양상의 동태적 변화를 파악하고, 신속하고 효과적인 재난 관리 및 정책 수립, 맞춤형 대응 전략 마련을 위한 증거 기반을 확보할 수 있다(Kim et al., 2017). 특히 대비가 미흡한 지역에 갑작스럽게 내리는 극한 강우는 예측과 준비의 어려움으로 인해 피해 규모가 더욱 커지는 경향을 보이며, 이로 인한 사회적 위험성도 크게 증대되고 있다(Gangani et al., 2024). 따라서 피해 규모와 발생 빈도를 포괄적으로 고려하는 다차원적 접근과 지역별 공간 특성을 반영한 체계적 분석, 그리고 이에 기반한 차별화된 대응 방안 마련의 필요성이 절실한 시점이다. 기존 연구들이 주로 단일 사건 또는 단기간의 피해 규모에 초점을 맞추었다면, 본 연구에서는 피해 규모와 발생 빈도를 동시에 고려함으로써 ‘얼마나 크게’ 뿐만 아니라 ‘얼마

나 자주' 피해가 발생하는지를 함께 평가한다는 점에서 차별성을 가진다. 특히 큰 피해가 반복되는 지역에 대상으로 한 빈도분석은 공간적 변동성이 큰 자료를 여러 해에 걸쳐 통합·해석해 반복적 고위험 지역을 도출하는 수단으로 가능하며, 이는 재난 관리 및 투자 우선 순위 설정을 위한 실질적 근거를 제공할 수 있다.

이에 본 연구는 전국 시·군·구를 대상으로 호우 피해액을 인구·면적·GRDP 기준으로 표준화하여 피해 규모를 유형화하고, 이 가운데 복합적으로 피해 규모가 큰 지역을 대상으로 빈도분석을 수행함으로써 피해 규모-빈도 관계를 통합적으로 규명하고자 한다. 나아가 이러한 규모-빈도 유형을 4대강 유역 및 공간적 입지 특성과 연계하여 분석함으로써 국내 호우 피해의 공간적 구조와 복합 취약 지역의 특성을 밝히고, 지역별로 차별화된 재난 대응 전략 수립에 활용 가능한 기초 자료를 제시하는 것을 연구의 주요 목적으로 한다.

본 연구의 목적을 달성하기 위해 설정한 연구 질문은 다음과 같다.

1. 인구, 면적, 경제 당 호우 피해 규모를 고려했을 때 호우 피해액이 모두 높은 지역은 어디인가?
2. 호우 피해 규모가 모두 높은 지역의 호우 피해 빈도는 어떻게 되는가?

II. 이론 및 선행연구 고찰

1. 호우 피해에 대한 고찰

호우에 대한 정의는 선행연구마다 다소 차이가 있지만, 공통적으로 많은 양의 비가 내리는 현상으로 규정된다. 호우는 단순히 도시의 경제적인 손실뿐만 아니라 지역 내 주민들의 안전과 복지에도 부정적인 영향을 미치고 있으며(Lee, 2023; Sim, 2025), 특히 대비가 되어 있지 않은 지역에 갑자기 내리는 극한 강우로 인해 피해를 입는 지역이 증가하고 있다(Gangani et al., 2024). 이와 같이 준비가 미흡한 지역에서 호우가 발생할 경우 인프라의 약점과 적절한 대피 시스템 부족으로 인해 단기간 내 광범위한 침수와 인명·재산 피해가 극대화된다는 점이 다양한 선행연구에서 보고되고 있다(Ermagun et al., 2024; Ciu et al., 2025). 특히 취약계층에 치명적인 위협을 초래하고, 질병, 생계 파피 등의

2차 피해로 이어질 가능성이 높다고 보았다(Ermagun et al., 2024).

추가로 본 연구는 분석 대상 재해를 태풍이 아닌 호우로 한정하였다. 태풍은 강풍·해일·광역 강수를 동반하는 복합 재해로서 피해 양상이 태풍 경로와 해안·도서 지역의 노출 특성에 크게 좌우되는 반면, 본 연구가 다루는 호우 피해는 단기간 국지성 집중호우와 불투수면 비율, 하천의 인공화, 저지대 분포, 도시화 수준 등 지역 내부의 공간적 요인에 의해 취약성이 결정되는 경우가 많다(Ha & Jung, 2017; IPCC, 2023). 두 재해를 하나의 표본으로 통합할 경우 태풍 특유의 영향과 호우 영향이 피해 통계에 혼재되어 호우 피해와 공간 특공간 관계가 왜곡될 수 있고, 특히 태풍에 반복적으로 노출되는 해안·도서 지역의 피해가 과대 반영되어 내륙 도시 및 하천 유역의 호우 취약성이 상대적으로 과소 평가될 우려가 있다. 따라서 본 연구는 '호우 피해액을 기반으로 한 지역 유형별 특성 규명'이라는 연구 목적에 부합하도록 재해 유형을 호우로 제한하였다.

2. 호우 피해에 영향을 미치는 특성에 대한 고찰

재난은 도시의 다양한 요인들이 상호 복합적으로 작용하며 발생한다는 점에서, 피해 규모와 공간적 분포 역시 도시의 여러 요인들에 의해 결정된다(IPCC, 2023; Lee, 2023). 도시 내 침수 피해 발생은 단순히 기상학적 요인에 의해서만 결정되는 것이 아니라 도시 내 다양한 공간적 특성이 복합적으로 작용함으로써 침수 피해 규모와 그 공간적 분포에 큰 영향을 미친다. 공간적 특성의 예시로는 도시화 수준, 토지이용, 인구밀도, 방재 인프라 등 도시를 구성하는 요소들이 있다. Park et al. (2020)은 도시의 침수 피해에 영향을 주는 공간적 요인을 유형화하여 구조적·비구조적 관점에서 분석하였다. 구체적으로 오픈 스페이스의 확보는 유출수의 저감을 통해 침수 위험을 완화할 수 있으며, 방재시설의 분포와 용량 역시 침수 저감에 핵심적 역할을 한다는 사실이 밝혀졌다. 반면 불투수면적의 증가, 고밀도 개발, 인구의 집중은 도시 자체의 침수 취약성을 증대시킨다. 또한 도시 규모가 클수록 침수의 피해 비율이 뚜렷하게 높아진다는 결과가 도출되었으며, 침수 피해가 반복적으로 발생하는 상습지구는 공간적으로도 뚜렷한

군집성과 높은 상관성을 보이는 경향이 있음이 보고되었다. 최근 국내외 도시들에서는 이러한 공간적 요인을 종합적으로 분석하여 침수 위험도 평가, 토지이용 계획, 재해에 강한 도시공간구조 설계 등과 연계하려는 경향이 확대되고 있다. 이처럼 도시의 침수 피해를 효과적으로 저감하기 위해서는 구조적 방재시설 확충 못지않게, 공간적 특성과 비구조적 대책을 함께 고려한 종합적 접근이 필수적임을 다수의 선행연구가 시사한다(Park et al., 2011; Debbage, 2019; Park et al., 2020). 그러나 이러한 특성을 바탕으로 침수 피해를 평가할 때, 단발적 피해 규모만을 고려하는 데 그치지 않고 피해 발생의 빈도를 함께 분석해야 구조적으로 취약한 지역을 보다 정확히 식별할 수 있다.

호우 피해를 평가함에 있어 피해 규모와 피해 빈도는 상호 보완적인 관점에서 동시에 고려되어야 한다. 피해 규모는 재난이 한 번 발생했을 때의 재산 및 인명 피해의 심각성을 반영하며, 피해 빈도는 얼마나 자주 피해가 발생하는지를 보여줌으로써 침수 취약성의 지속성과 위험도를 평가하는 데 필수적이다. 이를 반영한 다차원 분석은 피해 규모가 큰 지역과 피해 빈도가 높은 지역 사이의 차별화된 공간 특성을 더 정확히 파악할 수 있도록 한다(Park et al., 2009; Lee, 2023). 그러나 최근 발표된 많은 연구들에서는 여전히 피해 규모와 빈도를 동시에 포함하지 못하고 어느 한쪽에 치우친 분석이 주를 이루고 있다. 국내 홍수·호우 관련 연구들은 대체로 피해 규모나 피해액을 중심으로 공간적·사회경제적 요인을 분석하거나(Park et al., 2011; Kim et al., 2018), 빈도별 홍수량에 따른 피해액을 산정하거나 호우 피해 예측 함수를 개발하는 데 초점을 두어왔다(Choi et al., 2017; Kang et al., 2018). 이러한 연구 경향은 피해의 복잡한 양상과 지역별 위험 특성을 포괄적으로 반영하는 데 한계를 초래한다. 또한 피해가 자주 발생하지만 규모는 작은 지역과 피해는 드물지만 규모가 큰 지역 간의 특성과 대응 전략의 차이를 체계적으로 구분하지 못하는 문제점으로 이어진다(Park et al., 2009). Park et al.(2009)은 이러한 연구 경향을 지적하며, 기존 홍수 및 호우 관련 연구들이 발생 빈도와 피해 규모를 고려한 연구는 드물다고 보고하였다. Lee and Choi(2016) 또한 연평균 피해액만을 사용하는 경우 홍

수 발생 빈도를 충분히 반영하지 못 하며, 발생 횟수와 피해 강도를 함께 고려할 필요가 있다고 강조하였다. 따라서 본 연구에서는 이러한 선행연구 검토를 바탕으로 하여 피해 규모와 빈도를 동시에 고려한 통합적 분석을 통해 보다 실질적이고 차별화된 지역 유형화를 수행하고자 한다.

3. 호우 피해 규모 평가를 위한 요소에 대한 고찰

호우 피해의 규모는 침수 범위와 수심뿐 아니라 노출되는 인구 및 자산의 경제적 가치에 따라 크게 좌우되는 것으로, 여러 연구에서 반복적으로 확인되고 있다. 먼저 국제 연구에서 Zahran et al.(2008)은 텍사스주 832개의 홍수 사건을 분석하면서 인구밀도가 높은 도시 지역에서 홍수 피해 발생 확률이 유의미하게 증가함을 확인하였으며, 재산 피해 규모 역시 호우 피해를 증폭시키는 요인으로 작용함을 보였다. Liu et al.(2015)은 인디애나주 카운티 단위의 1995~2012년 홍수 피해 데이터를 분해 분석한 결과, 미래 기후 변화 시나리오에서 피해 증가분의 60% 이상이 자산 가치(노출) 증가에 기인한다고 보고하였으며, GRDP나 부동산 가치가 높은 지역에서 동일한 침수 조건이라도 절대 피해액이 수배 이상 커지는 경향을 강조하였다. 또한 Wing et al.(2020)이 미국 전역의 국가 홍수 보험 프로그램(Nature Flood Insurance Program, NFIP)에서 제시하는 보험 청구 자료와 고해상도 수심 모델링을 결합한 2백만 건 이상의 분석에서, 침수 수심이 증가할수록 건물 및 내용물 피해율이 비선형적으로 급증하는 depth-damage curve를 정량적으로 도출하였다. 특히 수심 1m 이상에서 피해율이 50%를 초과하는 패턴을 보였으며, 이는 침수 면적이 확대될수록 총 피해액이 기하급수적으로 증가한다는 점을 뒷받침한다.

다음으로 국내 학술지 연구에서도 이러한 관계가 일관되게 보고되고 있다. Park et al.(2020)은 도시공간적 요인에 의한 침수 피해 영향 분석에서 도시화 부분의 인구밀도와 지역내총생산(Gross Regional Domestic Product, GRDP)이 클수록 침수 피해액이 증가하는 것으로 분석되어 침수 피해 유발 원인으로 판단하였다. Ha and Jung(2017)은 도시화와 강우량이 도시 홍수 피해에 미치는 영향 연구에서 인구밀도와 경제적 요인이

피해 규모를 증폭시키는 핵심 요인임을 서울·부산 사례를 통해 입증하였다. Kim et al.(2018)은 지역적 특성을 고려한 호우 피해 분석에서 지형적 특성과 인구 규모에 따라 호우 피해가 차별화되며, 특히 인구밀도 고 지역에서 평균 및 최대 피해액이 크게 나타남을 빈도 분석 결과로 확인하였다. Park et al.(2020)은 도시공간적 요인에 의한 침수 피해 영향 분석에서 도시화 부분의 인구밀도와 지역내총생산(Gross Regional Domestic Product, GRDP)이 클수록 침수 피해액이 증가하는 것으로 분석되어 침수 피해 유발 원인으로 판단하였다. Park and Song(2023)은 침수 피해와 취약 요인 관계 연구에서 GRDP 수준이 피해액을 결정짓는 주요 변수로 작용함을 강조하였다.

III. 연구 방법

1. 빈도분석에 대한 고찰

먼저 빈도분석이란 무작위로 변화하는 자료를 확률 통계학적 이론을 토대로 얼마나 큰 값이 얼마나 자주 일어나는지 또는 특정 빈도로 일어나는 값의 크기가 얼마인지를 추정하는 방법이다(Kwak et al., 2024). 본 연구에서는 수문학 분야에서 빈도분석 방법으로 흔히 쓰이는 확률도시법(Probability Plotting Technique)을 재난관리 분야에 적용해 호우 피해 특성을 분석하였다. 확률도시법으로 빈도분석을 실시하기 위해 우선 가장 큰 값의 자료부터 가장 작은 값의 자료까지 내림차순으로 정렬하여 순위에 따라 도시 위치를 구한다. 도시 위치 공식을 이용해 재현기간인 T를 구하고, 이를 이용해 호우 피해 발생 빈도를 구할 수 있게 되는 것이다(Park et al., 2009). 도시 위치 공식으로는 Gringorten(1963), Cunnane(1978), Kim et al.(2012), Weibull(1939) 등 여러 방법이 있다. 이 방법들은 사용되는 데이터의 특성에 따라 어떤 공식을 사용할지가 달라지는데, 먼저 Gringorten(1963)은 데이터 분포가 주로 GEV일 때 사용되며 보정값이 존재한다. 추가로 Gringorten(1963)은 극치사상에 주로 사용된다. Cunnane(1978)도 마찬가지로 보정값을 사용하며, 데이터 분포가 GEV, log-Gumbel 등 다양한 분포에 적용이 가능하다. Kim et al.(2012)은 가장 복잡한 공식을 가지고 있으며, 표본외도

와 그 제공까지 보정하므로 극한의 수문자료에 적합하다. 반면 Weibull(1939)은 가장 단순하고 전통적이며 범용적인 기본 공식으로 쓰이며 호우에 관한 빈도분석에서 주로 사용된다. 따라서 본 연구에서는 데이터의 분포 형태와 상관없이 쓰이는 Weibull 공식을 쓰고자 한다. 식은 (1)과 같으며, 여기서 m은 전체 자료를 크기 순으로 배열했을 때의 순위, n은 자료의 총 개수를 의미한다. T는 평균 재현기간을 뜻한다(Park et al., 2009; Ologhadien, 2021)

$$weibull : P(X > x) = \frac{m}{n+1} = \frac{1}{T} = 1 - P(X \leq x) \quad (1)$$

다만 본 연구에서 피해 빈도는 누적 피해액 시계열의 재현 기간으로 정의된다. 즉 특정 시·군·구에서 관측된 연도별 누적 호우 피해액을 내림차순 정렬하여 Weibull 공식을 적용하고, 해당 규모 이상의 피해가 발생할 평균 재현기간(T)을 산정하는 방식이다. 실제 강우사상별 발생 횟수를 직접 집계하는 방법 대신 이 방식을 선택한 이유는 다음과 같다. 기상청 강우사상 자료는 관측소 및 유역 단위로 제공되며, 행정구역인 시·군·구 단위로 정확히 집계된 공식 통계가 존재하지 않아 공간적 비교에 한계가 있다. 또한 강우사상만으로 빈도를 계산하면 실제 피해가 전혀 발생하지 않은 지역에서도 강우 빈도를 피해 빈도로 간주하여 경제적 피해 빈도를 과대평가하게 된다. 반면 누적 피해액 시계열 분석은 실제로 금전적 피해가 발생한 해에만 초점을 맞추므로 정책적으로 우선순위를 정할 때 더 실질적이고 유용한 지표가 된다(Park et al., 2009; Lee & Choi, 2016). 이는 실제 강우사상 횟수를 집계한 것이 아니라 피해 통계의 시간적 반복성을 정량화한 지표임을 명확히 한다.

2. 표준화 방법에 대한 고찰

본 연구에서 각 지역의 호우 피해 규모를 산정할 때 사용된 자료들은 단위 및 범위가 서로 상이하기 때문에 원자료 상태로는 직접 비교하기 어렵다. 따라서 값들의 크기, 범위, 단위에 따른 차이에 관한 문제를 해소하기 위해서는 값들을 표준화하여야 한다. 표준화란 모집단의 평균 값과 표준편차 값을 이용하여 산출하는

단계로서, 모집단 각 관찰치의 상대적 위상을 계량적으로 표시하기에 적합한 측정치로 변환하는 과정이다 (Park et al., 2010). 표준화를 위한 방법론으로 Rank, Z-Score, Re-Scaling, 평균상위 및 평균하위 지표, 순환 지표, 균형지표 방법 등이 주로 사용된다(Kim et al., 2017). 이중에서도 표준점수법은 표본의 평균 값과 표준편차 값을 활용하여 해당하는 변량을 표준화시키는 방법으로, (2)와 같이 표현된다.

$$Z\text{-score} = \frac{X_i - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

이 식에서 Z는 표준점수 값, X_i 는 i 번째 표본의 변량 값, μ 는 표본의 평균, σ 는 표본의 표준편차를 의미한다 (Altman, 1968; Kim et al., 2018). Z-score 정규화는 머신러닝과 통계 분석에서 널리 사용되는 데이터 정규화 기법으로, 각 데이터의 평균을 0으로, 표준편차를 1로 변환하는 방법이다. 이 과정은 데이터를 평균을 중심으로 위치시키고, 단위 표준편차를 가지도록 스케일링하는 것을 의미한다(kim et al., 2025). 따라서 본 연구에서는 보편적이며 극한값을 정밀하게 파악할 수 있는 Z-Score 방법을 이용하였다.

본 연구에서 사용한 Z-Score는 각 지표 값이 전체 평균에서 몇 개의 표준편차만큼 떨어져 있는지를 나타내는 통계적 척도로, 특정 값이 '안전' 또는 '위험'의 절대 임계값을 의미하지는 않는다. 그럼에도 불구하고 국내외 홍수위험지수 연구에서는 Z-Score를 활용하여 지자체 간 상대적 위험 수준과 순위를 산정하고, 이를 기반으로 방재사업의 우선순위를 설정하는 방식이 활용되고 있다(Jung et al., 2014). 특히 각 지자체가 활용할 수 있는 재정 여건이 한정된 상황에서 모든 지역을 절대 기준에 따라 일괄적으로 관리하기보다는 상대적으로 위험도가 높은 지역을 선별하여 우선적으로 투자하는 것이 효과적인 방재 정책 수립에 요구된다. 이러한 맥락에서 본 연구는 Z-Score가 홍수 위험의 절대 임계치를 의미하지 않음을 전제하되, 전국 시·군·구 간 호우 피해 수준의 상대적 크기를 비교하고 복합적으로 높은 피해 수준을 보이는 지역을 우선 관리 대상 지역으로 도출하기 위한 도구로 활용하였다.

IV. 연구 설계

본 연구는 전국 시·군·구를 대상으로 하여 호우 피해 규모를 기준으로 지역 유형을 도출한 뒤, 그 중 복합적으로 피해 규모가 큰 지역을 선별하여 피해 빈도 특성을 추가로 분석하는 것을 목적으로 한다. 즉 1단계에서는 인구·면적·GRDP를 고려한 호우 피해 규모의 상대적 수준을 비교하여 전국적인 취약 지역을 식별한다. 2단계에서는 이들 중 고위험 지역을 대상으로 피해 발생의 반복성·지속성을 파악함으로써 “어디에서 피해가 크며, 그 피해가 반복되는가”를 규명하고자 한다. 이를 위해 먼저 호우 피해액을 인구, 면적, GRDP로 정규화하여 지자체 간 규모 차이로 인한 왜곡을 최소화하고, Z-Score를 이용해 각 지표의 상대적 수준을 산정한다. 다음으로 세 기준을 결합하여 피해 규모에 따른 3유형을 분류하고 세 기준 모두에서 피해가 큰 유형을 복합 고위험 지역으로 정의한 뒤, 이들 지역을 대상으로 Weibull 분포를 활용한 빈도분석을 실시하여 평균 재현기간을 추정한다. 분석의 시간적 범위는 2014~2023년인 10년간이며, 공간적 범위는 우리나라 전체 시·군·구(특·광역시 자치구 포함)이다. 주요 변수는 국민재난안전포털의 호우 피해액 통계, KOSIS의 인구 및 GRDP, 국토교통부 통계누리의 시·군·구 면적 자료 등을 활용하였다.

한편 본 연구에서는 호우 피해 정도를 정량화하는 지표로서 호우 피해액을 선정해 분석에 활용하였다. 호우 피해액은 호우로 인해 발생한 총 금액 손실을 소비자 물가 지수에 따라 특정 연도 기준으로 조정된 금액이다(Brody et al., 2008). 많은 선행연구에서는 호우로 인한 피해 결과를 수치화한 값으로 호우 피해액을 호우 피해의 규모와 빈도를 판단하는 기준 변수로 선정하여 분석하고 있다(Brody et al., 2008; Ha & Jung, 2017; Park & Song, 2023). 따라서 본 연구에서도 호우 피해액을 중심으로 도시 호우 피해 양상을 나타내는 지역 유형화를 진행하고자 한다.

데이터 구축을 위해 먼저 전국 단위 시·군·구 별 호우 피해액 데이터를 수집하였다. 호우 피해액 데이터는 국민재난안전포털의 '재해연보'와 국민재난안전포털의 '자연재난상황통계'로부터 획득하였다. 연구 대상

기간은 2014~2023년으로 총 10년동안의 자료를 사용하였으며, 최근(2023년) 기준의 가치에 맞춰 이전 자료의 호우 피해액 가치를 환산하여 사용하였다. 대구광역시 분석대상 구·군 중 절반 이상에서 호우 피해액이 0으로 집계된 점을 자료 신뢰성 검증 차원에서 추가적으로 확인하였다. 행정안전부 '생활안전정보'의 침수흔적도 자료를 검토한 결과, 2013년부터 2024년까지의 기간 동안 해당 지역에서 공식적으로 확인된 침수흔적 사례는 존재하지 않았음을 확인하였다. 본 검증 과정을 통해 대구 지역의 호우 피해 규모가 0으로 집계된 데이터가 실제 침수 피해 발생 현황과 일치하며, 연구에 이용된 피해액 자료가 해당 지역의 재해 발생 특성을 합리적으로 반영하고 있음을 추가적으로 확인하였다.

호우 피해액의 경우 침수 면적이 넓을수록, 인구가 많을수록, 경제적 수준이 높을수록 경제적 피해가 커지는 특성이 있다는 선행연구들이 있다(Kim et al., 2018; B. Dong et al., 2023). 따라서 호우 피해액을 인구

와 면적, GRDP로 나눈 값인 인구와 면적, GRDP 당 호우 피해액을 세 가지 기준 변수로 하였다. 전국 단위 시·군·구 별 면적 데이터는 국토교통부의 '통계누리' 자료를 참고하였으며, 시·군·구 당 인구 및 GRDP는 KOSIS 국가통계포털을 참고하였다. 각 기준 별 호우 피해액을 정규화해 지역별로 도출한 값은 Figure 2와 같이 시각화하였다. 시각화 과정에서는 호우 피해액의 공간적 분포 특성을 고려하여 QGIS 프로그램 3.44.4 버전에서 등급 분류 방법으로 Natural Breaks(Jenks)를 적용하였다. Natural Breaks 방식은 각 등급 내 분산을 최소화하고 등급 간 분산을 최대화함으로써 이러한 데이터의 자연스러운 군집과 경계를 반영할 수 있어 실제 피해 수준 차이를 지도상에서 보다 명확하게 드러낸다는 장점이 있다. 반면 등분위(Quantile)나 등간격(Equal Interval) 방식은 값의 분포와 무관하게 구간을 기계적으로 나누기 때문에, 극단값 존재 시 대부분의 지역이 유사한 등급에 포함되거나 위험도 차이가 왜곡 및 과소 표현될 우려가 있다(Brewer, 2002; Campbell & Michael,

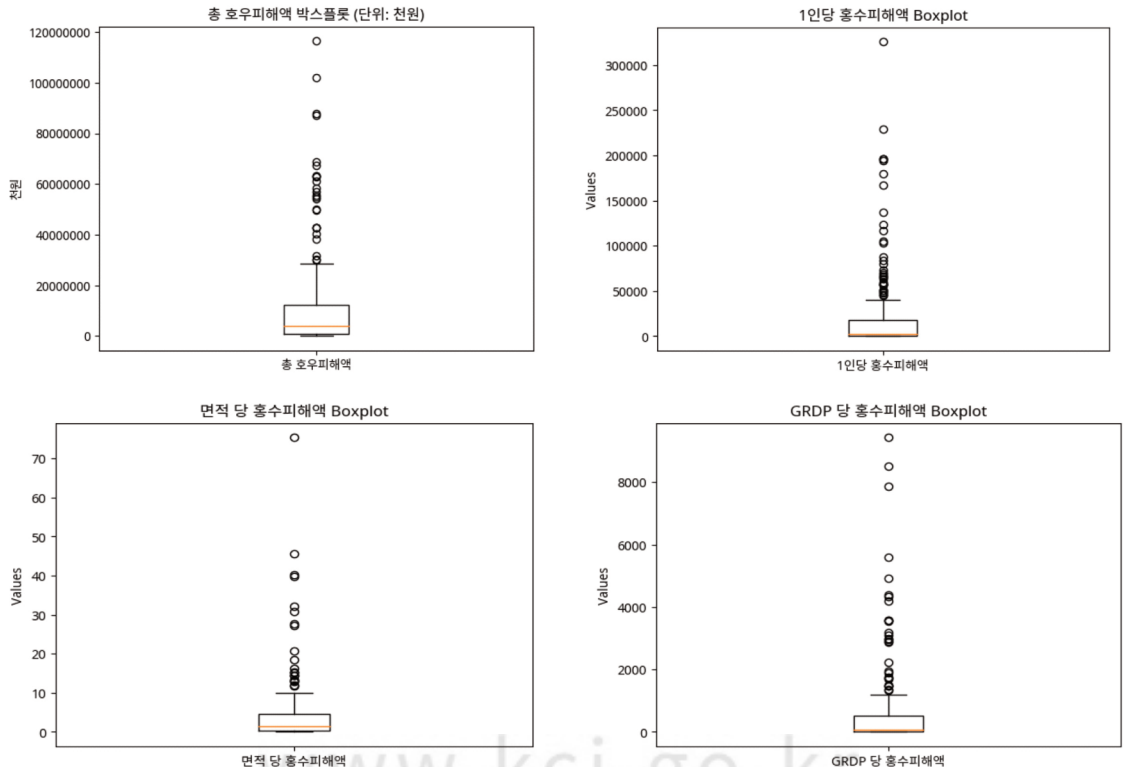


Figure 1. Box Plot Based on Damage Magnitude - Amount of heavy rain damage per Population, Area, GRDP

2011). 이에 본 연구에서는 호우 피해의 상대적 고위험·저위험 지역을 직관적으로 식별하고, 이후 지역 유형화 결과와의 해석을 용이하게 하기 위해 Natural Breaks 분류를 채택하였다.

V. 지역 유형 분류

1. 각 기준에 따른 지역별 피해 규모

원자료의 관측치 수가 많아 개별 값을 모두 제시하는 데에는 한계가 있으므로, 변수별 분포 특성을 효과적으로 파악하기 위해 각 호우 피해액 지표를 박스 플롯(Box Plot)으로 시각화하였다(Figure 1 참고). 박스 플롯은 중앙값, 사분위 범위 및 이상치를 함께 제시함으로써 자료의 전반적인 분포 경향과 지역 간 편차를 종합적으로 확인할 수 있도록 한다. 이를 통해 각 변수별 호우 피해액의 상대적 수준과 분포 특성을 간결하게 비교·분석하고자 하였다.

유형화 분석 결과, 정규화된 값을 기준으로 1인당 호우 피해액이 가장 높게 나타난 지역은 경상북도 봉화군(7.16)이며, 이어 충청남도 청양군(4.09)과 충청북도 단양군(4.14)이 뒤를 이었다. 한편 면적당 호우 피해액은 전반적으로 낮은 경향을 보였으나, 서울특별시 동작구(8.62), 서울특별시 영등포구(5.02), 서울특별시 관악구(4.36)가 상대적으로 높은 값을 기록하였다. 주목할 점은 서울특별시 지역이 높은 순위를 기록하고 있다는 사실로, 이는 인구가 많고 GRDP가 높은 대도시의 특성이 유형화 과정에서 반영되었음을 시사한다. GRDP당 호우 피해액의 경우에는 정규화된 값을 기준으로 경상북도 예천군(6.65), 경상북도 봉화군(5.96), 전

라남도 구례군(5.48)이 가장 높은 값을 나타내었다. 본 연구에서는 1인당 GRDP가 아닌 전체 GRDP를 활용하였는데, 이는 인구 수와 GRDP가 항상 비례하지 않는다는 기존 선행연구(Kim, 2014; Lim, 2019) 결과를 고려한 것이다. Kim(2014)은 인구 증가는 GRDP 증가와 같은 방향으로 나타날 수 있으나, 인구 증가율과 1인당 GRDP 증가율 간에는 오히려 음(-)의 상관관계가 관찰된다고 보고하였다. 그리고 Lim(2019)은 지방 소도시의 인구 증감과 GRDP 간 상관관계를 실증적으로 분석하였으며, 1인당 GRDP와 인구성장률 사이에는 통계적으로 유의한 상관성이 있지만 그 패턴이 도시별·시기별로 상이하게 나타난다는 점을 제시하였다. 이러한 근거에 따라 본 연구는 개인 단위가 아닌 지자체(시·군·구) 수준에서 전체 GRDP를 기준으로 호우 피해액을 분석하고자 하였다.

총 호우 피해액, 1인당 호우 피해액, 면적당 호우 피해액, GRDP당 호우 피해액의 원자료를 시각화함으로써 각 지표별 호우 피해 규모의 분포 특성을 직관적으로 파악할 수 있도록 하였다(Figure 2 참고). 분석 결과 네 변수 모두 일부 지역에서 매우 큰 값이 관측되는 반면, 다수 지역은 상대적으로 낮은 수준의 값을 보이는 것으로 나타났다. 특히 총 호우 피해액은 지역 간 편차가 크게 나타났으며, 일부 지역에서 매우 높은 피해 규모가 집중적으로 발생하는 양상을 보였다. 이는 호우 피해가 모든 지역에 균등하게 분포하기보다는 특정 지역에서 대규모로 발생하는 특성을 지님을 의미한다. 특히 인구 규모와 도시 규모가 상대적으로 큰 지역에서 피해액이 높게 나타나는 경향이 확인되었다. 1인당 호우 피해액의 경우, 총 피해액이 높은 지역과 반드시

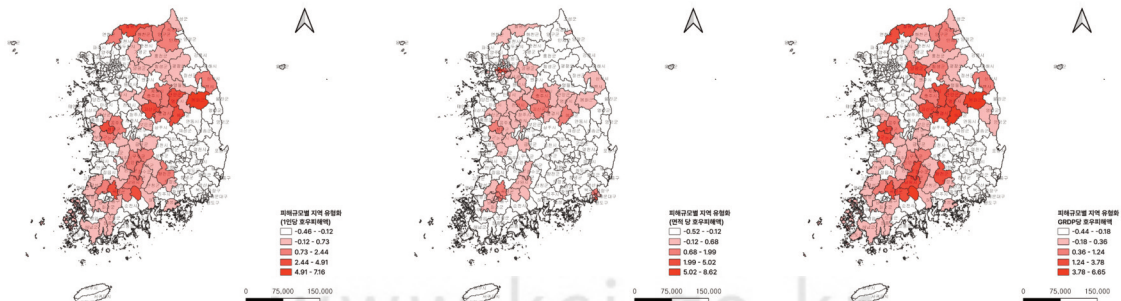


Figure 2. Regional Typology Based on Damage Magnitude - Amount of heavy rain damage per Population, Area, GRDP

일치하지는 않는 것으로 나타났다. 인구 규모가 작은 지역에서도 1인당 피해액이 높게 나타나는 사례가 관찰되었으며, 이는 인구 대비 피해 부담이 특정 지역에 상대적으로 집중되어 있음을 시사한다. 즉 절대 피해 규모보다 주민 개개인이 체감하는 피해 강도가 더 두드러지는 지역이 존재한다는 점에서 의미가 있다. 면적당 호우 피해액은 도시 밀집 지역에서 비교적 높은 값을 보이는 경향이 나타났다. 동일한 피해 규모라도 면적이 작은 지역에서는 단위 면적당 피해 강도가 높게 산정되므로 공간적 밀집성과 피해 집중도가 반영된 지표로 해석할 수 있다. 이는 토지 이용 밀도와 재해 취약성이 결합될 경우 피해가 공간적으로 응축되는 경향이 있음을 보여준다. GRDP당 호우 피해액은 경제 규모 대비 피해 부담을 나타내는 지표로, 일부 지역에서 상대적으로 높은 값이 관찰되었다. 이는 지역 경제 규모에 비해 피해 수준이 과중하게 나타나는 지역이 존재함을 의미하며, 경제적 회복 탄력성 측면에서 취약 가능성을 내포한다. 종합적으로 볼 때 총 피해액은 대규모 지역에서 높게 나타나는 경향이 있으나, 표준화 지표(1인당, 면적당, GRDP당)는 상대적으로 규모가 작은 지역이나 특정 구조적 특성을 가진 지역에서 두드러지게 나타났다. 이는 호우 피해가 단순한 절대 규모의 문제가 아니라 지역의 인구 구조, 공간 구조, 경제 구조와 밀접하게 연관되어 있음을 시사한다.

2. 피해 규모에 따른 존 유형화

이전 단계에서 산출한 인구, 면적, GRDP 기준 호우 피해액의 표준화 값이 0보다 크면 1, 0 이하이면 0으로 각각 변환하여 이진화하였다. Z-Score는 각 관측값이 전체 평균에서 얼마나 떨어져 있는지를 표준편차 단위로 나타내는 지표로, 0보다 작은 값은 전체 평균보다 낮은 수준, 0보다 큰 값은 평균을 상회하는 수준을 의미한다. 따라서 표준화된 값이 0보다 작을 경우 해당 지역의 호우 피해 규모가 전국 평균보다 작은 것으로, 0보다 클 경우 평균보다 큰 것으로 해석하였다. 이는 홍수 위험 지수 및 취약도 지수 연구에서 Z-Score를 활용하여 상대적 고·저를 구분한 선행연구의 방법론과 일치한다(Jung et al., 2014; Kim et al., 2018). 이러한 방식을 이용하여 세 가지 변수를 조합함으로써 나타낼 수 있

Table 1. Zonal Classification Considering Damage Magnitude

| Zone | Population | Area | GRDP |
|------|------------|------|------|
| 000 | ↓ | ↓ | ↓ |
| 001 | ↓ | ↓ | ↑ |
| 010 | ↓ | ↑ | ↓ |
| 100 | ↑ | ↓ | ↓ |
| 011 | ↓ | ↑ | ↑ |
| 101 | ↑ | ↓ | ↑ |
| 110 | ↑ | ↑ | ↓ |
| 111 | ↑ | ↑ | ↑ |

는 경우의 수는 총 8가지(000, 001, 010, 100, 011, 101, 110, 111)이다(Table 1 참고).

각 조합의 이진 코드는 각 시·군·구가 세 가지 지표 기준에서 상대적으로 어느 수준에 해당하는지 시각적으로 인지할 수 있도록 설계하였다. 표준화된 값을 기준으로 0보다 크면 평균을 상회하는 피해 수준, 0보다 작으면 평균 이하의 피해 수준을 의미한다. 이러한 배경을 바탕으로 Figure 3에서는 1의 개수가 0개인 경우를 초록색, 1개인 경우를 노란색 계열, 2개인 경우를 주황색 계열, 3개인 경우를 빨간색으로 시각화하여 지역별 상대적 위험도를 명확히 구분하였다.

한편 분석 결과 011(면적·GRDP당 값만 높음), 001(GRDP당 값만 높음) 조합에 해당하는 지역은 나타나지 않아 실제 시각화에는 반영되지 않았다. 이는 표준화된 세 지표 간 상관 구조 및 지역별 호우 피해 분포 특성에서 기인할 수 있다. 예를 들어 GRDP당 호우 피해액이 높은 지역이 동시에 면적이거나 인구 당 지표에서도 일정 수준의 값을 나타내는 경향이 있고, GRDP 하나만 단독으로 높은 사례가 드물었기 때문으로 해석된다. 또한 인구 및 면적 기준 피해가 낮으면서 GRDP 기준 피해만 높은 구조 역시 현실성이 있다고 판단되지 않아 조합에 누락이 발생한 것으로 볼 수 있다. 종합적으로 호우 피해액을 인구·면적·경제 요인으로 나누어 분석한 결과, 세 변수 모두에서 피해 수준이 높은 복합 취약 지역은 도시 및 산업 중심의 내륙 유역 지역에 집중되어 있는 것으로 나타났다.

Figure 4는 기존의 호우 피해 규모별 존 유형화와 4대 강 수계를 함께 나타낸 그림이다. 분석 결과, 빨간색으로 나타난 23개 시·군·구는 주로 4대강의 상류와 하류,

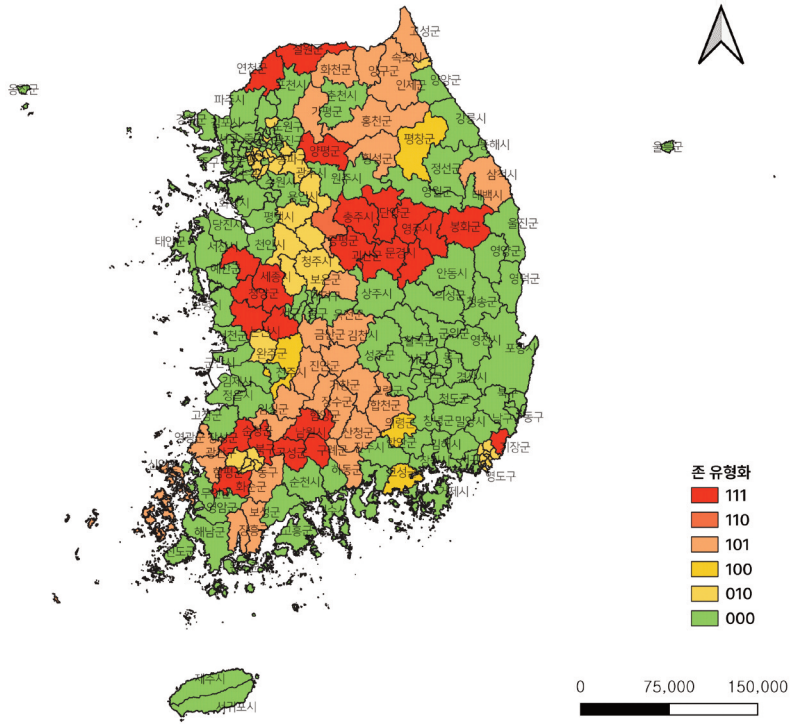


Figure 3. Zonal Classification Considering Damage Magnitude

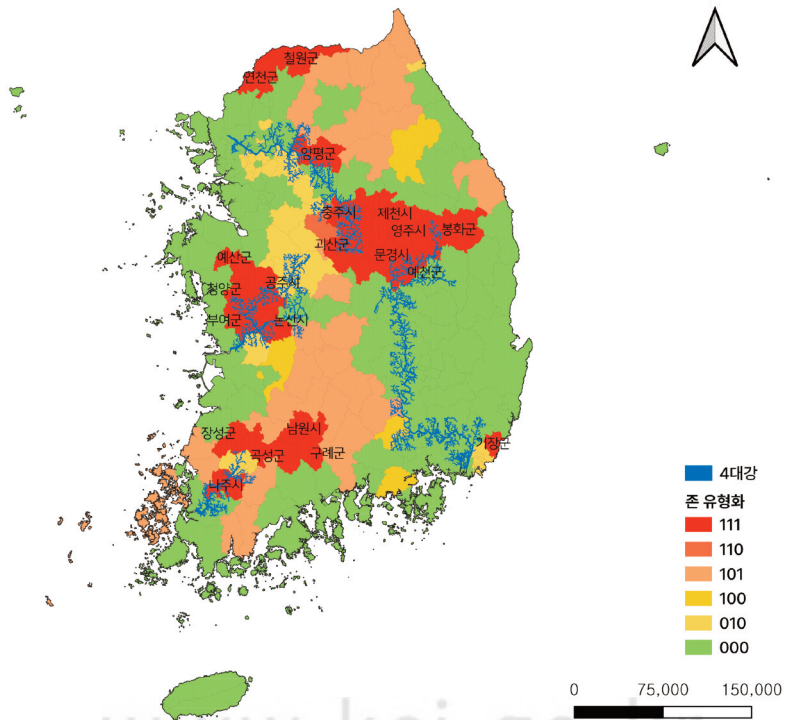


Figure 4. Zonal Classification Considering Damage Magnitude with Four Major Rivers

및 중상류 하천망 인접 지역에 집중 분포하는 경향을 보인다. 특히 한강의 중하류, 금강의 중하류, 낙동강의 상류 및 하류, 영산강의 중상류에서 피해가 심각한 지역(빨간색_111)으로 확인된다. 이와 같은 결과는 하천 유역별 수문·지형적 특성, 도시화와 인구 및 자산 밀집 양상이 주요 원인임이 보고되고 있다. 중상류 지역은 급경사 지형과 집중 강우에 따른 유출의 속도가 빠르며, 유역 면적의 유하시간이 짧아 홍수 발생이 빈번하다. 이로 인해 집중호우 시 빠른 유량 증가로 홍수 피해 발생 가능성이 높아진다. 한편 하류 지역은 상대적으로 평탄한 지형에 대규모 도시화와 산업화가 진행되면서 불투수 면적이 증가하였고, 인구 밀집으로 인한 경제 자산의 집중도도 높아 호우 시 침수 피해 규모가 크게 확대된다. 특히 4대강 사업에서 설치된 대형 보들은 홍수 시 물의 흐름을 제한하고 지천과 본류 간의 배수 능력을 저하시켜 상류에서 발생한 유출수가 원활히 배출되지 못하고 하류 지역 침수 피해를 가중시키는 환경적 요인으로 작용한다(Jung et al., 2004).

복합취약 지역 중 일부는 4대강 유역에 속하지 않음

에도 높은 피해 수준을 보였는데, 이들 지역은 대체로 지형적 저지대이거나 연안과 접한 지역으로 나타났다. 이러한 입지는 해수면 상승, 폭우 시 조위 상승과 배수 역류 등의 영향을 직접적으로 받기 쉽기 때문에 하천 범람이 아닌 내수 및 연안 복합형 침수 피해의 주요 발생지로 기능한다. 먼저 저지대 지역은 유역 내에서도 고도가 낮고, 하천 합류부나 도심 내 배수로 말단부에 위치하는 경우가 많다. 이러한 지역은 강우 시 유출수가 집중되기 쉬우며, 배수펌프나 관로의 용량이 한계에 도달할 경우 침수 지속시간이 길어진다. 특히 도시화로 인한 불투수 면적 증가가 배수 속도를 저하시키고, 하수관거의 역류나 월류 현상으로 피해가 반복적으로 발생한다. 따라서 저지대 지역의 호우 피해는 단기 집중 호우보다 배수 체계의 한계와 지형적 종속성에서 비롯된 구조적 취약성으로 이해할 수 있다(Ha & Jung, 2017; Park & Song, 2023). 경기도 연천군과 강원도 철원군, 충청남도 예산군, 전라북도 남원시, 전라남도 구례군이 이에 해당된다.

다음으로 부산광역시 기장군은 연안 지역으로, 집중

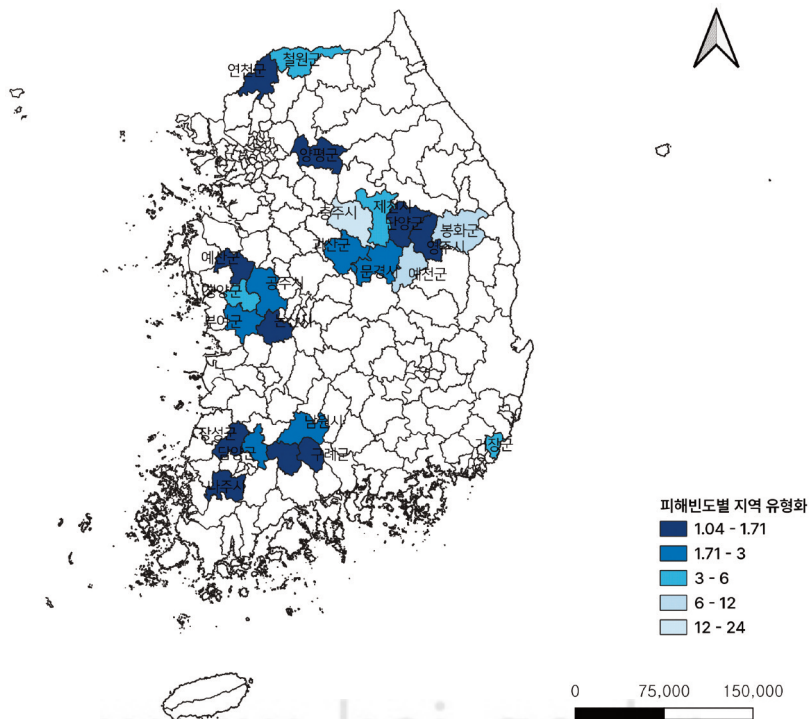


Figure 5. Regional Typology Based on Damage Frequency

호우 시 우수가 불어나면서 바닷물과 합류하여 침수가 일어나는 경우가 발생한다. 우수의 증가와 바닷물 유입이 합쳐져 침수가 발생하는 특성이 빈번하게 관찰된다. 이를 방지하기 위해서는 단순한 배수관거 개선을 넘어서 방조설비 구축과 우리나라의 해안 도시 특성을 반영한 중·장기적 재해 대응계획이 필요하다(Yoo et al., 2013). 이러한 연구 결과는 지역별 맞춤형 재난 대응체계 구축과 지속 가능한 방재 정책 수립에 중요한 기초 자료로 활용될 것이다.

3. 피해 빈도에 따른 지역 유형화

이전과 같이 구축한 전국 시·군·구 별 면적당 호우 피해액 데이터를 기반으로, Weibull 공식을 적용하여 각 시·군·구 별 평균 재현기간 T를 산정하였다. T는 해당 지역에서 약 T년에 한 번 호우 피해가 발생함을 의미하며, 이를 통해 피해 발생 빈도의 시간적 특성을 파악

하였다. 이후 T 값을 기준으로 시·군·구 별 피해 빈도 유형화를 수행하였다. 피해 빈도 유형화 결과는 Figure 5에 시각적으로 제시하였으며, 자세한 수치는 Table 2에 표현하였다.

피해 빈도 값은 피해 규모와 달리 값이 작을수록 호우 피해가 자주 발생하는 것을 의미하므로 결과 해석 시 값의 역방향 적용이 필요했다. 즉 피해 빈도가 높은 지역은 T 값이 상대적으로 낮게 나타났으며, 이를 반대로 적용하여 빈도 중심의 지역 유형화를 완성하였다. 피해 규모별 지역 유형화와 달리 피해 빈도별 지역 유형화는 존 유형화에서 세 가지 변수의 호우 피해액 값에서 모두 높게 나온 111의 유형이 나온 23개의 지역만을 대상으로 진행하였다. 이는 호우 피해 규모 분석에서 세 기준 모두에서 전국 평균을 상회하는 고위험 지역(111)인 red zone이 가장 심각한 취약성을 보이는 것으로 확인되었기 때문이며, 전체 시·군·구를 대상으로

Table 2. Regional Typology Based on Damage Frequency

| Region Name | Amount of Flood Damage (Unit: thousand KRW) | Average Period (T) |
|-----------------------------------|------------------------------------------------|--------------------|
| Gijang-gun, Busan | 67,280,373 | 4.8 |
| Yeoncheon-gun, Gyeonggi-do | 40,424,906 | 1.333333333 |
| Yangpyeong-gun, Gyeonggi-do | 54,091,006 | 1.714285714 |
| Cheolwon-gun, Gangwon-do | 63,325,115 | 4 |
| Chungju-si, Chungcheongbuk-do | 116,482,784 | 24 |
| Jecheon-si, Chungcheongbuk-do | 87,048,862 | 6 |
| Goesan-gun, Chungcheongbuk-do | 61,344,236 | 2.666666667 |
| Danyang-gun, Chungcheongbuk-do | 49,779,232 | 1.6 |
| Gongju-si, Chungcheongnam-do | 62,871,976 | 3 |
| Nonsan-si, Chungcheongnam-do | 26,107,665 | 1.142857143 |
| Buyeo-gun, Chungcheongnam-do | 58,412,432 | 2.4 |
| Cheongyang-gun, Chungcheongnam-do | 63,164,129 | 3.428571429 |
| Yesan-gun, Chungcheongnam-do | 24,757,258 | 1.043478261 |
| Namwon-si, Jeollabuk-do | 57,103,941 | 2.181818182 |
| Naju-si, Jeollanam-do | 28,471,409 | 1.2 |
| Damyang-gun, Jeollanam-do | 54,887,059 | 1.846153846 |
| Gokseong-gun, Jeollanam-do | 30,346,682 | 1.263157895 |
| Gurye-gun, Jeollanam-do | 42,711,573 | 1.411764706 |
| Jangseong-gun, Jeollanam-do | 25,211,609 | 1.090909091 |
| Yeongju-si, gyeongsangbuk-do | 42,879,329 | 1.5 |
| Mungyeong-si, gyeongsangbuk-do | 55,588,273 | 2 |
| Yecheon-gun, gyeongsangbuk-do | 101,994,072 | 12 |
| Bonghwa-gun, gyeongsangbuk-do | 87,866,345 | 8 |

빈도 분석을 할 경우 피해 규모가 낮은 지역의 특성이 결과에 과도하게 영향을 미쳐 고위험 지역의 상대적 빈도 패턴이 희석될 우려가 있어 고위험 지역의 장기적 재해 발생 패턴을 명확히 규명하고자 한 기준 선별 접근이다. 이러한 방법은 규모와 빈도를 동시에 반영한 통합적 위험 평가의 타당성을 높이며, 정책적으로도 핵심 방재 대상지의 빈도 특성을 파악해 장기적 대비 우선순위를 설정하는 데 직접 활용 가능할 것으로 보인다. 정규화하기 전 값을 기준으로 충청북도 충주시는 T 값이 24로, 24년에 한 번 빈도로 호우 피해가 일어나는 것을 알 수 있었다. 경상북도 예천군은 T 값이 12로 12년에 한 번 꼴로, 경상북도 봉화군은 8년에 한 번의 빈도인 것을 알 수 있었다. 이는 해당 지역들에서 다른 지역에 비해 낮은 빈도로 중대 호우 피해가 발생한다는 의미로, 장기적인 관점에서 재난 대비 및 예방 대책 마련이 요구된다. 또한 T 값이 높을수록 피해는 드물게 발생하지만 그 규모가 클 수 있음을 고려해야 하며, 다른 지역과의 상대적 위험도 비교 시 중요한 지표로 활용될 수 있다. 즉 피해 발생 빈도가 매우 낮은 지역이라도 극심한 피해가 일어날 잠재성을 내포하고 있으며, 각각의 T 값을 바탕으로 한 빈도 분석은 장기 재난 예방정책과 미래 재해 위험 분포 예측에서 매우 중요한 자료로 사용된다.

VI. 결론

1. 연구의 시사점

본 연구에서는 인구·면적·GRDP 기준으로 표준화한 호우 피해액을 활용해 전국 시·군·구의 피해 규모를 유형화하고, 이후 이 가운데 세 기준 모두에서 평균 이상 피해를 보인 111 유형 23개 지역을 대상으로 피해 빈도 분석을 수행하였다. 그 결과 복합 고위험 지역들은 단순히 한 번의 극한 호우로 큰 피해를 입는 수준을 넘어, 중·장기적으로도 반복적인 피해가 발생하는 경향을 보여 규모와 빈도가 동시에 높은 지속적 고위험 권역으로 확인되었다.

먼저 피해 규모와 빈도를 결합한 분석을 통해 “단일 대규모 재해형 고위험 지역”과 “소규모 피해의 반복형 고위험 지역”이 명확히 구분되었다. 일부 111 유형 지

역은 건당 피해액이 매우 크지만 재현기간인 T가 길어 상대적으로 드물게 발생하는 반면, 다른 지역들은 건당 피해액은 중간 수준임에도 T 값이 1~2년에 불과해 거의 매년 수준으로 피해가 반복되고 있었다. 이는 동일하게 “111(복합취약)”으로 분류된 지역이라도, 어떤 곳은 대규모·저빈도형 재해에 대비해야 하고 다른 곳은 중·소규모·고빈도형 재해 관리가 핵심이라는 점을 시사하며, 피해 규모 정보만으로는 이러한 차이를 포착하기 어렵다는 한계를 보완한다.

두 번째로 피해 규모와 빈도의 결합은 방재 전략의 우선순위와 방식을 세분화하는 근거를 제공한다. 대규모·저빈도형 지역의 경우, 1회 발생 시 사회·경제적 충격이 매우 크기 때문에 하천 정비, 유역 단위 저류지·방조 시설, 대규모 배수펌프 확충 등 고비용·장기투자의 구조적 대책이 요구된다. 반면 중·소규모 피해가 자주 반복되는 고빈도형 지역에서는 비교적 적은 비용으로도 효과를 볼 수 있는 배수로 정비, 저지대 국지 개선, 정보체계 및 보험·복구지원 제도 등 생활밀착형·비구조적 대책의 효율성이 더 크다. 즉 동일한 ‘고위험’이라도 규모·빈도 조합에 따라 투자 방향과 정책 도구가 달라져야 하며, 본 연구의 유형화는 이러한 차별화된 전략 수립의 기준 축을 제시한다.

세 번째로 111 유형의 23개 지역이 4대강 상·중·하류와 일부 연안·저지대에 집중되어 있고, 이들 중 상당수가 피해 빈도 또한 높은 것으로 나타났다는 점은 수문·지형적 취약성과 도시·경제 노출이 중첩된 구조적 위험을 의미한다. 급경사 중상류 유역에서는 짧은 유하시간과 집중호우가 결합해 홍수 파고가 빠르게 형성되고, 하류·연안부에서는 도시화와 불투수면 확대로 인해 동일 강우에도 내수 침수와 배수 역류 피해가 반복되는 양상이 나타난다. 이러한 공간적 패턴은 유역 차원의 치수·방재계획과 도시계획(토지 이용, 개발 제한, 녹지·저류 공간 확보)을 통합적으로 설계해야 할 필요성을 뒷받침하며, 특히 111 유형 중 재현 기간이 짧은 지역을 국가 차원의 최우선 관리 대상 권역으로 설정할 수 있는 근거를 제공한다.

다음으로 피해 규모·빈도 결합 분석은 기후변화 하에서의 동태적 위험 관리에도 시사점을 준다. 극한 강우의 강도·빈도가 증가하는 상황에서 과거에는 드물게

발생하던 대형 피해가 빈번해지거나 반복적인 소규모 피해가 누적되어 장기적인 경제·사회 손실을 키울 가능성이 크다. 본 연구에서 제시한 Z-Score 기반 피해 규모 유형화와 Weibull 빈도분석의 결합은 향후 새로운 관측값이 추가될 때마다 위험 유형의 변화를 주기적으로 업데이트할 수 있는 틀을 제공하며, 이를 통해 위험의 상승 및 확산을 조기에 포착하고 선제적 대응이 가능한 모니터링 시스템 구축에 활용할 수 있다.

마지막으로 피해 규모와 빈도를 동시에 고려한 본 연구의 접근은 향후 다차원 취약성 지수 및 예측 모형 고도화의 기초가 된다. 인구·면적·GRDP 외에도 사회 취약 지수, 인프라 노후도, 보험 가입률, 기상·수문요소 등의 지표를 추가해 Z-Score 혹은 다른 정규화 기법으로 통합한다면, 규모·빈도·취약성이 결합된 종합 위험 지수의 구축이 가능하다. 이는 단순 피해 통계 분석을 넘어, 재난관리 예산 배분, 보험료·재정지원 차등, 도시·국토계획과 연계된 증거 기반 재해 리스크 거버넌스를 설계하는 데 중요한 근거 자료로 기능할 것으로 기대된다.

2. 연구의 한계점

본 연구는 호우 피해액 기반 지역 유형화와 빈도분석을 결합한 다차원적 접근을 시도하였다는 점에서 의의가 있으나, 다음과 같은 몇 가지 한계점을 내포하고 있다. 먼저 호우 피해액 통계 자료의 일관성 문제를 완전히 배제하기 어렵다. 피해액은 지자체별 신고 기준 및 집계 방식에 따라 편차가 발생할 수 있으며, 이로 인해 실제 피해 규모가 과소 또는 과대 반영될 가능성을 완전히 배제하기 어렵다. 특히 피해 규모가 0으로 집계된 지역의 경우 실제 피해 발생 여부를 침수흔적도 등의 보조 자료로 검증하였으나, 전국 모든 시·군·구에 걸쳐 동일한 수준의 검증이 이루어지지 못하였다는 점에서 자료의 균질성에 일부 한계가 있다.

두 번째로 표준화 지표 선정의 제한성이다. 본 연구는 인구, 면적, GRDP의 세 가지 기준으로 호우 피해액을 정규화하고 Z-Score를 산출하여 지역 유형을 분류하였다. 그러나 Z-Score는 전국 평균을 기준으로 상대적 위치를 나타내는 통계적 척도일 뿐, 절대적 위험 임계값을 의미하지 않는다. 따라서 특정 연도에 전국적

으로 피해 수준이 전반적으로 낮은 경우, 상대적으로 고위험으로 분류된 지역이 실질적으로는 위험하지 않을 수 있다는 해석상의 유의가 필요하다. 또한 사회 취약 지수, 인프라 노후도, 보험 가입률, 지형 경사도 등 호우 피해의 취약성을 결정짓는 다양한 요인들이 분석에 포함되지 못하였다는 점에서 지표 선정의 포괄성에 한계가 있다.

마지막으로 빈도분석 대상 지역의 제한성이다. 본 연구에서는 세 가지 기준 모두에서 전국 평균을 상회하는 111 유형에 해당하는 23개 시·군·구만을 대상으로 빈도분석을 수행하였다. 이는 핵심 고위험 지역의 피해 패턴을 명확히 규명하기 위한 의도적 선별이나, 111 유형에 포함되지 않은 나머지 지역들의 피해 빈도 특성은 분석에서 제외되어 전국적 수준의 빈도 특성을 종합적으로 파악하는 데에는 한계가 있다. 핵심 고위험 지역의 피해 패턴을 명확히 규명하기 위한 의도적 선별이나, 111 유형에 포함되지 않은 나머지 지역들의 피해 빈도 특성은 분석에서 제외되어 전국적 수준의 빈도 특성을 종합적으로 파악하는 데에는 한계가 있다.

사사

본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 “신기후체제 대응 환경기술개발사업”의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2022-KE002124).

This work was supported by Korea Environment Industry & Technology Institute(KEITI) through “Climate Change R&D Project for New Climate Regime”, funded by Korea Ministry of Climate, Energy and Environment (MCEE). (RS-2022-KE002124)

References

- 강동호, 이석호, 김길호, 김병식. (2018). 건물군 인벤토리가 고려된 다차원법을 활용한 홍수피해액 산정. 2. 한국방재학회 논문집, 18(7), 119-127.
- Kang D., Lee S., Kim G., Kim B. (2018). Estimation of Flood Damage Using Building Group Inventory and Multi-Dimensional Flood Damage Analysis.

- Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(7), 119-127.
- 김덕준. (2014). 경기도와 충남 47개 지방정부 역내 재원수준 비교분석 - 시·군 단위 지방정부 GRDP 시계열 자료 분석을 중심으로 -. 한국비교정부학보, 18(3), 123-142.
- Kim D. J. (2014). Comparative Analysis of Local Governments' GRDP in Gyeonggi-Province and Chungcheongnam-do. *Korean Comparative Government Review*, 18(3), 123-142
- 김동현, 최창현, 김종성, 이준형, 배영혜, 김형수. (2018). 지역적 특성을 고려한 호우피해 분석. 2. 한국방재학회 논문집, 18(4), 311-320.
- Kim D. H., Choi C. H., Kim J. S., Lee J. H., Bae Y. H. & Kim H. S. (2018). Analysis of Heavy Rain Damage Considering Regional Characteristics. *Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(4), 311-320.
- 김연우, 김병훈, 고건식, 최민웅, 송희섭, 김기훈, 유승훈, 임종태, 복경수, 유재수. (2017). 실시간 기상 빅데이터를 활용한 홍수 재난안전 시스템 설계 및 구현. 한국콘텐츠학회논문지, 17(1), 351-362.
- Kim Y. W., Kim B. H., Ko B. S., Choi M. W., Song H. S., Kim K. H., Yoo S. H., Lim J. T., Bok K. S., Yoo J. S. (2017). Design and Implementation of a Flood Disaster Safety System Using Realtime Weather Big Data. *The Journal of the Korea Contents Association*, 17(1), 351-362.
- 김종성, 최창현, 이종소, 김형수. (2017). 호우 위험도 평가를 이용한 피해예측: (1) 호우피해위험지수 산정. 한국방재학회, 17(2), 361-370.
- Kim J. Choi C. Lee J. Kim H. (2017). Damage Prediction Using Heavy Rain Risk Assessment: (1) Estimation of Heavy Rain Damage Risk Index. *Korean Society of Hazard Mitigation*, 17(1), 351-362.
- 박기용, 오후, 전원식, 이의훈. (2020). 도시공간적 요인에 의한 침수피해의 영향 분석. 한국산학기술학회, 21(9), 238-250.
- Park K. Y., Oh H., Jeon W. S., Lee E. H. (2020). An Analysis of Flood Damage Influence by Urban Spatial Factors. *The Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 21(9), 238-250.
- 박두호, 안재현, 최용준. (2011). 우리나라 호우특성과 홍수피해와의 상관관계. 한국습지학회, 13(2), 219-229.
- Park D. H., Ahn J. H., Choi Y. J. (2011). Correlation between Storm Characteristics and Flood Damage. *Korean Wetlands Society*, 13(2), 219-229.
- 박주영, 강선아, 문수진, 홍제우. (2024). 침수흔적정보를 활용한 기후변화 피해비용 추정 연구. 한국환경정책학회 학술대회논문집, 10(10), 17.
- Park J. Y., Kang S. A., Mun S. J., Hong J. W. (2024). Estimating the cost of climate change using the flood map. *Proceedings of the Korean Society of Environmental Policy Conference*, 10(10), 17.
- 박태선, 여창건, 최민하, 이승오. (2010). 지역별 홍수피해특성을 고려한 홍수피해지표 개발. 대한토목학회, 30(4B), 361-366.
- Park, T., Yeo, C. G., Choi, M., & Lee, S. O. (2010). Flood Damage Index regarding Regional Flood Damage Characteristics. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, 30(4B), 361-366.
- 박태선, 최민하, 여창건, 이승오. (2009). 홍수피해 발생빈도-피해액 관계분석을 통한 지역별 홍수피해 특성 분석. 2. 한국방재학회 논문집, 9(5), 87-92.
- Park T. S., Choi M. H., Yeo C. G. Lee S. O. (2009). Analysis of Regional Flood Damage Characteristics using Relationship between Flood Frequency and Damages. *Korean Society of Hazard Mitigation*, 9(5), 87-92.
- 박한나, 송재민. (2023). 침수피해와 침수취약요인 관계 연구: 피해액과 인명피해를 중심으로. 대한 국토·도시계획학회, 58(3), 149-166.
- Park H. N., Song J. M. (2023). Relationship between Flood Damage and Flood Vulnerability Focusing on Property Damage and Human Casualties. *Journal of Korea Planning Association*, 58(3),

- 149-166.
- 심지수. (2025). 그린인프라의 확대가 도시홍수 위험 저감에 미치는 영향: 부산시 2040 도시기본계획을 기반으로. 국토연구, 124, 91-105.
- Sim J. S. (2025). The Impact of Urban Park Expansion on Urban Flood Risk Reduction: A Study Based on Busan's 2040 Comprehensive Plan. *The Korea Spatial Planning Review* 124, 91-105.
- 이종석, 최현일. (2016). 연안지역 홍수피해자료 분석을 통한 홍수취약성 평가. 2. 한국방재학회 논문집, 16(2), 377-385.
- Lee J. S., Choi H. I. (2016). Flood Vulnerability Assessment by Analysis of Flood Damage Data in Coastal Areas. 2. *Korean Society of Hazard Mitigation*, 16(2), 377-385.
- 이종석, 최현일. (2016). 홍수피해자료 분석방법 비교에 의한 홍수취약성지수 산정. 2. 한국방재학회 논문집, 16(2), 427-435.
- Lee J. S., Choi H. I. (2016). Flood Vulnerability Index Estimated by Comparing Analysis Methods of Flood Damage Data. 2. *Korean Society of Hazard Mitigation*, 16(2), 427-435.
- 이진용. (2023). 도시 홍수: 원인, 영향 및 저감 전략 고찰. 대한지질공학회, 33(3), 489-502.
- Lee J. Y. (2023). A Review of Urban Flooding: Causes, Impacts, and Mitigation Strategies. *The Journal of Engineering Geology (KSEG)*, 33(3), 489-502.
- 임석희. (2019). 지방소도시의 인구감소 및 성장과 쇠퇴의 특성. 대한지리학회지, 54(3), 365-386.
- Yim S. H. (2019). Local Small Cities's Population Reduction and the Characteristics of Their Growth and Decline. *Journal of the Korean Geographical Society*, 54(3), 365-386.
- 유창주, 홍순현, 최현, 남광우. (2013). 침수흔적도를 활용한 침수지역 유형화에 관한 연구: 부산광역시 사례로. 한국측량학회지, 31(5), 393-400.
- Yoo C. J., Hong S. H., Choi H., Nam G. W. (2013). A Study on Flood Area Typology Using the Inundation Trace Map - A Case Study of Busan Metropolitan City -. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 31(5), 393-400.
- 정재욱, 이재응, 김진영, 윤세의. (2004). 상류유역 개발에 따른 하류부 침수피해 영향 분석 - 영산강 유역을 중심으로 -. 한국방재학회, 4(2), 1-12.
- Jung J. W., Yi J. E., Kim J. Y., Yoon S. E. (2004). An effect analysis of the lower basin floods due to the upper stream development in Youngsan River. *Korean Society of Hazard Mitigation*, 4(2), 1-12.
- 최창현, 김종성, 김정환, 김한용, 이우주, 김형수. (2017). 통계적 방법론을 이용한 호우피해예측함수 개발. 2. 한국방재학회 논문집, 17(3), 331-338.
- Choi C., Kim J., Kim J., Kim H., Lee W., Kim H. (2017). Development of Heavy Rain Damage Prediction Function Using Statistical Methodology. *Korean Society of Hazard Mitigation*, 17(3), 331-338.
- 하경준, 정주철. (2017). 도시화와 강우량이 도시홍수 피해에 미치는 영향에 관한 연구. 국토계획, 52(4), 237-252.
- Ha G. J., Jung J. C. (2017). The Impact of Urbanization and Precipitation on Flood damages. *Journal of Korea Planning Association*, 52(4), 237-252.
- Altman, E. I. (1968). Financial Ratios, Discriminant Analysis and the Prediction of Corporate Bankruptcy. *The Journal of Finance*, 23(4), 589-609.
- Boliang Dong, Junqiang Xia, Qijie Li1, Xiaojie Wang. (2023). Fine-scale damage assessment of urban flooding based on the 1D/2D coupled hydrodynamic model. *river* 2(4), 403-420.
- Brody, S.D., Zahran, S., Highfield, W.E., Grover, H., Vedlitz, A. (2008). Identifying the impact of the built environment on flood damage in Texas. *Disasters*, 32, 1-18.
- Cui, P., Bazai, N.A., Qiang, Z. et al. (2025). Flood risk assessment with machine learning: insights from the 2022 Pakistan mega-flood and climate adaptation strategies. *npj Nat. Hazards* 2, 42.
- Cynthia A. Brewer, Linda Pickle. (2002). Epidemiological

- Data on Choropleth Maps in Series. *Annals of the Association of American Geographers*, 92, 662-681.
- Dharmarathne, G., Waduge, A. O., Bogahawaththa, M., Rathnayake, U., & Meddage, D. P. P. (2024). Adapting cities to the surge: A comprehensive review of climate-induced urban flooding. *Results in Engineering*, 22, 102123.
- Ermagun, A., Smith, V., Janatabadi, F. (2024). High urban flood risk and no shelter access disproportionately impacts vulnerable communities in the USA. *Commun Earth Environ* 5, 2.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Climate change 2023: Synthesis report. Summary for policymakers. In H. Lee & J. Romero (Eds.), Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.
- Itolima Ologhadien. (2021). Study of Unbiased Plotting Position Formulae for the Generalized Extreme Value (GEV) Distribution. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 6(4), 94-99.
- Jung Y., Shin Y., Jang C., Kum D., Kim Y., Lim K., Kim H., Park T., Lee S. (2014). Estimation of flood risk index considering the regional flood characteristics: a case of South Korea. *Paddy Water Environ* 12 (Suppl 1), 41-49.
- Campbell, J. E., & Shin, M. (2011). Essentials of geographic information systems. <https://www.saylor.org/books/> Saylor Foundation.
- Liu J., Hertel T., Delgado M. S., Ashfaq M., Diffenbaugh N. (2014). Future Property Damage from Flooding – Sensitivities to Economy and Climate Change. *Agricultural and Applied Economics Association*.
- Kwak Nayeon, Virginia Smith, Kelly D. Good. (2024). Assessing the influence of green stormwater infrastructure implemented for combined sewer overflow control on urban streamflows. *Journal of Hydrology*, 640.
- Neil Debbage. (2019). Multiscalar spatial analysis of urban flood risk and environmental justice in the Charlanta megaregion, USA. *Anthropocene*, 28.
- Wing O.E.J., Pinter N., Bates P.D. Kousky C. (2020). New insights into US flood vulnerability revealed from flood insurance big data. *Nature Communications* 11, 1444.
- Kim YangSeon, Kim Moon Keun, Nuodi Fu c, Jiying Liu d, Junqi Wang c,e, Jelena Srebric f. (2025). Investigating the impact of data normalization methods on predicting electricity consumption in a building using different artificial neural network models. *Sustainable Cities and Society*, 118.
- Zahran S., D.Brody S., Peacock W. G., Vedlitz A., Grover H. (2008). Social vulnerability and the natural and built environment: a model of flood casualties in Texas. *Disasters*, 32(4), 537-560.