



통합적 위험성 평가를 기반으로 한 홍수위험성 평가 : 낙동강 권역을 사례로*

Integrated Flood Risk Assessment : Object-Level Analysis in Korea's Nakdong River Basin

양정현** · 유종현***

Yang, Jeong-hyun · Yoo, Jonghyun

Abstract

Climate change is intensifying flood risks in Korea, particularly in river basins susceptible to heavy rainfall and typhoons. This study provides a spatially detailed flood-risk assessment of the Nakdong River basin by comprehensively evaluating exposure, hazard, and vulnerability across five asset categories: residential, agricultural, vehicle, human life, and industrial assets. An object-level assessment that analyzes individual buildings and cultivated land is conducted using advanced geospatial and socio-economic data to quantify the expected annual damage. The findings reveal significant spatial variations in flood risk, with residential and agricultural assets demonstrating the highest vulnerability. Notably, asset risk differs significantly by location and type: residential buildings in low-elevation areas encounter heightened risk, whereas urban vehicular assets are particularly exposed in the first level and basement-parking zones. These insights underscore the critical necessity for integrating granular risk assessments into flood-mitigation policies and urban-land-use planning. By highlighting the differential vulnerabilities of specific asset types, this study provides actionable guidance for targeted infrastructure interventions and risk-reduction strategies.

주제어 홍수위험평가, 낙동강 권역, 공간정보분석, 연간기대피해액, 자연재해관리

Keywords Flood Risk Assessment, Nakdong River Basin, Spatial Analysis, Expected Annual Damage, Natural Disaster Management

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

전 세계적으로 진행 중인 기후변화는 각국에서 이상기후 현상을 유발하며, 가뭄, 폭염, 폭우 등 다양한 자연재해를 일으키고 있다. 특히, 대표적 기후 재해인 폭우는 최근 여러 국가에서 빈번히 발생하여 대규모 피해를 초래하고 있다. 예를 들어, 2022년 파

키스탄의 홍수는 국토 면적의 3분의 1을 침수시켰으며, 2023년 리비아 대홍수는 6천 명 이상의 사망자를 기록하며 기후 재앙의 대표적인 사례로 남았다. 최근 조사에 따르면, 미국 내 자연재해로 인한 사망자 수 중 홍수로 인한 사망자가 토네이도, 허리케인, 번개 등 다른 재해로 인한 사망자보다 많은 것으로 집계되었다(NSSL, 2023).

역사적으로 우리나라도 호우와 태풍으로 인한 홍수 피해에 취약하다. 행정안전부(2022a)에 따르면, 지난 10년간 홍수로 인한

* 이 논문은 주저자 양정현의 2024년 5월 춘계산학술대회에서 발표한 논문과 석사학위 논문을 수정·보완하여 작성하였으며, 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 신기후체제 대응 환경기술개발사업의 지원을 받았음. (RS-2023-00218794)

** Master's Student, Department of Urban Planning and Design, University of Seoul (First Author: twobam@uos.ac.kr)

*** Assistant Professor, Graduate School of Public Administration, Seoul National University (Corresponding Author: jonghyun.yoo@snu.ac.kr)

국내 피해액은 연평균 3,428억 원에 이르며, 향후 기후변화로 인한 기온 상승과 열대저기압의 발생은 우리나라에서 집중호우의 빈도를 더욱 증가시킬 것으로 예상된다. 이에 따라 홍수로 인한 피해 역시 증가할 것으로 전망된다(기상청, 2021; 한국환경연구원, 2023).

기후 특성상 연간 강수량의 절반 이상이 여름철에 집중되는 우리나라는 집중호우로 인한 침수 피해를 자주 경험해 왔으며, 이를 효과적으로 방어하기 위한 기초 자료로서 하천별 혹은 지역별 침수 피해액을 비교적 이른 시기부터 정량적으로 산정해 왔다(건설교통부, 2001). 다수의 선행연구는 주로 공학적인 측면에서 수리·수문학적 분석을 바탕으로 홍수 피해를 정량적으로 산정하고, 이를 토대로 치수사업의 경제성을 평가하는 접근 방식을 취하고 있다(이충성 외, 2006; 임지은, 2019). 최근에는 기후변화 시대에 통합적인 재해 대응을 위해 공학적 구조물 대책과 함께 국토계획 측면에서의 비구조물적 대책을 병행하려는 시도가 이루어지고 있다(이병재, 2014). 대표적인 사례로, 서울시는 2040 물순환회복 기본계획에 도시관리를 통한 기후변화 적응 방안을 포함하여 통합적인 홍수 방어 대책을 마련하고 있다(서울특별시, 2021). 이러한 국토·도시계획적 홍수 방어 전략은 기후 불안정성과 불확실성이 증가하는 상황에서 홍수 피해 저감의 효과적인 보조 수단이 될 수 있다.

본 연구는 우리나라에서 규모가 가장 큰 낙동강권역을 대상으로 홍수 위험성을 정량적으로 평가하고, 국토계획적 시사점을 도출하였다. 특히, 위험성(Risk)을 구성하는 세 가지 요소인 위험요인(Hazard), 노출성(Exposure), 취약성(Vulnerability)의 공간적 상이성을 충분히 고려하기 위하여 다양한 사회·경제·재해 공간 데이터를 기반으로 세분화된 공간 단위의 위험성을 평가하였다.

II. 이론 및 선행연구 고찰

1. 위험성(Risk)의 정의 및 구성 요소

본 연구는 위험성(Risk) 개념을 기반으로 정량적인 홍수 평가를 수행한다. 위험성은 기존 연구에서 집중한 취약성(Vulnerability) 혹은 노출성(Exposure)과는 다소 차이가 있다. 따라서 본 절에서는 위험성의 개념을 먼저 소개하고자 한다.

기존의 정량적 평가에 기반이 되는 취약성(Vulnerability)은 기후변화로 인한 영향을 평가하기 위해 IPCC(2007)의 제4차 기후변화 평가보고서에서 제시된 개념으로, 재해에 노출된 정도(Exposure), 민감도(Sensitivity), 적응 역량(Adaptive Capacity) 등을 고려해 평가한다. 국내 연구에서도 재해의 취약성을 평가하여 지수나 등급 등의 이산적 지표로 사용하는 경우가 많다. 최근에는 기후변화와 관련된 영향을 취약도로 나타내는 연구가 활발히 진행되고 있는데, 예를 들어 김동욱 외(2021)는 폭염에 대

한 취약도를, 김지은 외(2019)는 가뭄에 대한 취약도를 지수로 평가하였다.

반면, 위험성(Risk)은 IPCC(2014)의 제5차 기후변화 평가보고서에서 제시된 개념으로, 재해나 기후변화로 인한 위험요인(Hazard)에 대한 노출(Exposure)과 취약성(Vulnerability)이 상호작용하여 나타나는 결과로 정의된다. 구체적으로 위험요인(Hazard)은 재해를 유발할 수 있는 자연적 또는 인위적 현상을 의미하며, 재해의 발생 가능성과 강도를 나타낸다. 홍수의 경우, 위험요인은 홍수의 빈도, 침수 범위, 침수 깊이 등을 포함한다. 노출성(Exposure)은 위험요인에 의해 영향을 받을 수 있는 인구, 자산, 인프라 등의 공간적 분포를 의미한다. 즉, 위험 지역 내에 위치한 사람과 자산이 얼마나 많은지를 나타낸다. 취약성(Vulnerability)은 노출된 요소들이 위험요인에 의해 피해를 입을 수 있는 정도를 나타낸다. 이는 노출된 자산이나 인구의 특성에 따라 달라지며, 예를 들어 건축물의 내구성, 인구의 사회경제적 상황, 재해 대비 수준 등이 취약성에 영향을 미친다. 이와 같은 위험성 프레임워크는 재해 관리와 기후변화 대응 전략 수립에 있어서 중요한 기반을 제공한다(Figure 1).

취약성과 위험성은 모두 기후변화나 자연재해에 대한 방재 정책을 수립하기 전에 현황 파악 및 문제점 도출, 정책의 우선순위 결정에 유용한 정보를 제공할 수 있다. 다만, IPCC에서 제안한 취약성 기반의 평가와 위험성 기반의 평가는 과정이 비슷하지만 결과에서는 큰 차이를 보일 수 있다. 취약성 평가는 취약한 정도의 현황을 분석하여 결정론적(Deterministic) 결과를 도출하는 반면, 위험성 평가는 위험에 대한 가능성과 잠재성을 바탕으로 사전적 예방을 목적으로 하는 확률적(Probabilistic) 결과의 도출이 가능하다. 또한 취약성 평가는 지수나 등급과 같은 단순한 지표를 사용하기 때문에 즉각적인 평가와 이해가 용이한 장점이 있는 반면, 위험성 평가는 발생 가능성이 낮더라도 피해 규모가 큰 경우를 포함하여 불확실성을 고려할 수 있다는 점에서 장점이 있다. 본 연구는 홍수와 같이 발생 가능성이 낮더라도 발생 시 대규모 피해를 초래할 수 있는 재해의 특성상, 취약성보다는 위험성 측면에서 접근하는 것이 더 적합하다고 판단하여 홍수 위험성을 평가하였다.

IPCC(2014), Rajkhowa and Sama(2021), Rosenzweig et



그림 1. IPCC 위험성 프레임워크(IPCC, 2014)
Figure 1. IPCC risk framework (IPCC, 2014)

al.(2024) 등 다수의 재해 연구는 홍수의 위험성(Risk)을 위험요인(Hazard), 노출성(Exposure), 취약성(Vulnerability)의 세 가지 요소로 정의하고 있으며, 각 요소를 분석함으로써 효과적인 위험 감소 및 대응 전략 수립에 기여할 수 있다고 보고하고 있다. 예를 들어, 위험요인(Hazard)을 줄이거나 노출성(Exposure)을 최소화하거나 취약성(Vulnerability)을 감소시키는 전략을 수립함으로써 효과적으로 재해에 대처할 수 있다. 이러한 측면에서 본 연구는 세 가지 요소를 모두 고려한 위험성(Risk)을 추정하고 이를 기반으로 재난 관리 및 국토계획적 시사점을 도출하고자 한다.

2. 홍수 위험성 평가 기법 관련 선행연구

그동안 선행연구에서는 홍수 위험성(혹은 피해액)을 정량적으로 평가하기 위한 다양한 방법을 제시하고 이를 활용해 왔다. 가장 널리 활용되는 방법인 다차원법은 행정구역(읍면동, 시·군·구 등) 단위의 자산가치에 침수 편입률을 사용하여 홍수 피해액을 산정하는 방식이다. 이를 활용하여 홍수 피해액을 산정한 대표적인 국내 연구에는 이근상 등(2011)이 있는데, 동 연구는 금강 수계의 일부를 대상으로 주거, 농업, 산업 자산의 홍수 침수 피해액을 산정하였다. 이를 발전시킨 이근상(2014)에서는 LiDAR와 공간정보를 연계하는 방식을 채택하여 주거 건물자산 및 농업자산에 대한 홍수 피해액을 산정하였다. 신지에 외(2014)는 부산시 연제구의 거제지구를 대상으로 수리 수문 모델링 소프트웨어를 이용하여 침수 영역을 산정하고 건축물, 건축물 내용물, 유형 및 재고자산, 차량 자산에 대한 홍수 피해액을 산정하였다. 박정기 외(2015)의 경우 GIS(지리정보시스템) 프로그램을 활용하여 구리시의 홍수 피해액을 빈도별, 지역별로 산정한 후 홍수 사상 시 가장 취약한 지역을 식별하였다. 탁용훈 외(2017)는 실제 침수 피해 발생에 대한 경우 자료를 수리 수문 모델링 소프트웨어에 입력하는 방식을 활용해 침수 범위 식별의 신뢰성을 향상시키고 도립천 유역의 건물 피해액을 산출하였다.

최근에는 홍수 피해를 더욱 상세한 공간 단위에서 평가하려는 시도가 이루어지고 있다. 나유경·최진무(2019)는 홍수 피해 산정 단위를 하천(수계)이나 지역 단위가 아닌 건축물과 같은 객체 단위로 설정하는 이른바 객체 기반법을 활용하여 울산광역시 건물에 대한 침수 피해액을 평가하였다. 특히 기존 연구에서 사용되어 온 다차원법과 상세한 공간 단위의 객체 기반법의 결과를 비교하여, 상세한 공간 단위의 분석에서 피해 추정치의 편이가 감소될 수 있음을 보였다.

국외에서는 상세한 공간 단위를 기반으로 한 홍수 위험성(피해액) 평가 연구를 다수 찾을 수 있다(Emergency Management Institute, 2003; Goda and De Risi, 2018). 특히 Scawthorn et al.(2006)의 연구에서는 미국 연방재난관리청에 의해 개발된 재해 모형(HAZUS-MH Flood Model)에 포함된 900개 이상의

피해 함수를 활용해 건물 및 기반시설에 대한 사회·경제적 손실을 상세한 공간 단위에서 계산하여, 제방 설치로 인한 위험성 저감 효과를 정량적으로 나타냈다. Chen et al.(2016)은 방글라데시 다카의 홍수 위험성을 건축물별로 산정하기 위해 상수도 네트워크 모형을 활용하였다.

3. 피해액 추정 관련 선행연구

선행연구에서 홍수 위험성 평가는 기본적으로 침수 규모(침수 심 혹은 침수 범위)에 피해 함수를 적용하는 방식으로 수행된다. 따라서 정확하고 상세한 피해 함수의 개발은 매우 중요하며, 피해 함수를 지역별 혹은 피해 유형별로 추정하는 다수의 연구를 찾을 수 있다. 국내 연구의 경우 이종소 외(2011)는 비선형 회귀식을 이용해 강수량과 홍수 피해액에 대한 추정 함수를 제시하여 홍수 피해액을 평가하였으며, 최창현 외(2017)는 낙동강 권역을 대상으로 주성분 분석과 로지스틱 회귀 모형을 적용하여 시·군·구 단위의 홍수 피해액을 추정하였다. 최천규(2017)의 경우 단순 회귀분석을 활용하여 주거 건물과 건물 내용물에 대한 피해 함수를 개발하여 일반적인 다차원법과 비교·평가하였다.¹⁾

홍수 사상에 따른 피해는 직접 피해와 간접 피해로 구분할 수 있다. 직접 피해는 홍수로 인한 주거 부문, 비주거 부문, 기반시설의 물리적 손실을 의미하며, 간접 피해는 홍수 발생 이후의 2차 피해로서 생산성 감소, 의료비 증가, 자산 가치 감소 등을 포함한다(Rose and Lim, 2002; Messner et al., 2007; Merz et al., 2010; Green et al., 2011; Hallegatte et al., 2011; Meyer et al., 2013). 대표적으로, Dutta et al.(2003)은 주거 및 비주거 건축물의 피해와 기반시설의 파손 등 물리적 요소에 대한 직접적인 피해를 정량적으로 평가하였으며, Jonkman et al.(2008)은 네덜란드 홍수 사상에 따른 간접 피해를 평가하였다. 간접 피해와 관련된 연구에는 특히 공공보건 부문의 영향을 평가한 연구를 다수 발견할 수 있다. Hajat et al.(2005)은 홍수로 인한 공공보건 문제로서 익사와 부상, 불안과 우울증의 정신 질환, 전염병 등을 제시하고, 노인, 장애인, 어린이, 여성, 소수 민족, 저소득층이 특히 홍수 피해에 취약함을 주장하였다. Harris et al.(2008)은 2007년 방글라데시의 홍수와 당시 유행한 질병인 설사병이 서로 관련이 있음을 밝혀내고, 공공보건 측면에서도 홍수 피해 저감의 필요성을 역설하였다. Tariq et al.(2020)의 연구에서는 앞선 연구와 같이 크게 직접 피해와 간접 피해로 나눌 수 있다고 하였으며, 직접 피해에는 주택, 농산물, 차량, 공장 등의 파손이 해당되고, 간접 피해는 지역 경제 위축 및 지역 사회 기능 저하와 같은 1차적인 피해, 공급망의 중단 혹은 타지역의 경제적 손실과 같은 홍수 피해 지역 외에서 발생하는 2차적인 피해로 나누고 있다. 추가적으로 홍수를 관리하기 위한 노력에서 발생하는 피해를 유도적 피해라하여 직·간접 피해와 따로 구분하여 설명하고 있다. 간접 피해 및 직접

피해와 관련된 대표적인 리뷰 논문으로는 Hammond et al.(2015)을 참고할 수 있다.

4. 본 연구의 차별성

선행연구와 비교하여 본 연구의 차별성은 다음 세 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 본 연구는 위험요인(Hazard), 노출성(Exposure), 취약성(Vulnerability) 등 위험성(Risk)을 구성하는 세 가지 요소를 모두 고려하여 국내 하천 범람으로 인한 위험성을 정량적으로 산정하였다. 특히 특정 빈도에 한정된 가상 시나리오를 기반으로 한 기존 연구의 정량적 평가와 달리, 본 연구에서는 위험성 지표로 연간기대피해액(Expected Annual Damage; EAD)을 사용하여 실제 발생 가능한 예상 피해액을 산정하였다.²⁾

둘째, 본 연구는 다양한 사회·경제·재해 데이터를 공간적으로 분석하여 홍수의 위험성을 매우 상세한 공간 단위에서 평가하였다. 이처럼 홍수의 위험성을 개별 건축물 혹은 개별 논·밭 등 세부적인 공간 수준에서 평가함으로써, 매우 작은 공간 단위에서도 상이하게 나타나는 위험요인, 노출성, 취약성의 차이를 고려하였다.³⁾

셋째, 본 연구는 홍수 사상에 따른 위험요인(Hazard)을 나타내는 공간 데이터로 국가의 공식 자료인 홍수위험지도(환경부, 2022)를 사용하였다. 일반적으로 홍수 위험성 평가 연구는 특정 수치 모형에 의존하여 모형 선택에 따른 편향 오류가 발생할 수 있으나, 본 연구에서는 국가의 공식 자료를 활용하여 보다 높은 신뢰성을 확보하였다. 또한 이를 통해 위험성 평가 시 활용되는 다양한 국가 자료와의 정합성을 확보할 수 있다.

III. 연구 방법

1. 연구 대상 범위

우리나라는 전국의 하천을 한강권역, 낙동강권역, 금강권역, 섬진강권역, 영산강권역의 5개 권역으로 구분하여 관리하고 있으며(국토교통부, 2020), 본 연구는 이 중 낙동강권역을 분석 대상으로 한다. 낙동강권역은 국가하천인 낙동강 본류와 더불어 형산강, 태화강, 회야강·수영강, 낙동강 동해, 낙동강 남해 등 총 6개의 수계로 구성되어 있다. 이 권역은 부산, 대구, 울산 등 세 개 광역시와 경상남도, 경상북도, 강원도, 그리고 일부 전라남도과 전라북도를 포함한 총 5개 도의 일부를 아우르며, 하천의 총길이는 9,571km로 5개 권역 중 가장 길다(한강홍수통제소, 2021). 최근 8년간(2014~2021년) 낙동강권역은 5개 권역 중 홍수 피해액이 가장 큰 지역으로, 연평균 피해액이 약 1천억 원에 달하는 것으로 보고된다(한강홍수통제소, 2021). 이는 낙동강권역이 강수량이 많을 뿐만 아니라, 권역 내 사회·경제적 자산의 밀집도가 높아 홍수 발생 시 피해 규모가 커지기 때문이다(한국환경연구원, 2022).

본 연구에서는 낙동강권역에서 발생하는 모든 홍수피해 중 지방하천의 범람으로 인한 홍수피해를 대상으로 한다. 국가하천의 범람이나 내수침수로 인한 홍수피해는 데이터(홍수위험지도) 구득의 한계로 제외하였으며, 이에 따라 본 연구에서 평가하는 홍수 위험성은 실제 피해액보다 과소평가될 가능성이 있음을 밝힌다.⁴⁾

본 연구에서는 홍수로 인한 위험성을 주거자산, 농업자산, 차량자산, 인명, 산업자산의 다섯 개 항목을 대상으로 추정한다. 이 중 차량자산을 제외한 4개 자산 피해 항목은 건설교통부(2004) 이래 국가 홍수피해 조사 대상에 해당된다. 차량 피해는 기존의 조사 대상이 아니었으나 최근 실제 침수 피해 사례에서 대규모의 피해가 발생하는 항목으로 확인되면서 피해 항목으로의 포함에 대한 논의가 활발히 진행되고 있다(한국개발연구원, 2019). 공공시설물 피해의 경우 국가의 홍수 피해 산정 항목 중 하나이나, 공공시설물의 범위가 넓고 각 시설에 대한 공간 데이터가 부족한 관계로 개별 객체에 대한 상세한 분석을 수행하는 본 연구에서는 제외하였다.⁵⁾

2. 위험성(Risk) 평가 방법 및 데이터

〈Figure 2〉는 본 연구에서 사용한 피해액 산정 방식을 도식화한 것이다. 본 연구의 차별성은 상세한 공간 단위 데이터를 활용하여 위험성(Risk)을 구축하는 다양한 요소(Hazard, Exposure, Vulnerability)를 종합적으로 고려한 데 있다. 이를 위해 각 요소에 해당하는 자산 데이터를 가능한 한 세부적인 공간 단위에서 구축하고 결합하여 위험성을 파악하였다. 〈Table 1〉은 본 연구에서 사용한 주요 데이터와 출처를 나타내고 있다.

먼저, 홍수의 위험요인(Hazard)은 홍수로 인한 침수 범위와 침수 깊이를 나타내는 것으로, 환경부(2022)에서 공식적으로 제공하는 홍수위험지도를 활용하였다. 동 지도는 하천 범람으로 인해 발생하는 침수범위와 침수심을 공간 데이터로 제공하며, 지방하천 대상 50년, 80년, 100년, 200년의 4개 빈도별 홍수위험 정보를 포함하고 있다. 홍수위험지도는 지형자료의 정확성, 홍수 시나리오 구성, 범람 해석 고도화를 위해 지속적으로 업데이트되고 있으며, 본 연구에서는 가장 최신의 데이터를 사용하였다.

다음으로 노출성(Exposure)은 홍수 위험 지역 내에 위치한 인구와 자산의 공간적 분포를 의미한다. 이를 파악하기 위해 다음과 같은 상세한 공간단위의 데이터를 수집하였다. 먼저 주거자산은 국토교통부(2022a)에서 제공하는 건축물대장 정보를 활용하여 건축물 단위(용도, 위치, 규모, 평가액 등)의 데이터를 사용하였다. 농업자산은 농림축산식품부(2022)의 원격탐사 기반 팜맵을 통해 농작지의 유형과 위치정보를 파악하고, 이를 통계청(2021)에서 제공하는 지역별 작물 생산 현황 및 생산비 자료와 결합하여 농경지 단위(폴리곤 단위) 농작물 정보를 구축하였다. 차량자산과 인구(일반 인구 및 취약 인구)는 국가에서 제공하는 상세 공간단위의 데이터가 부재한 관계로 행정구역별 차량 등록 통계(국토

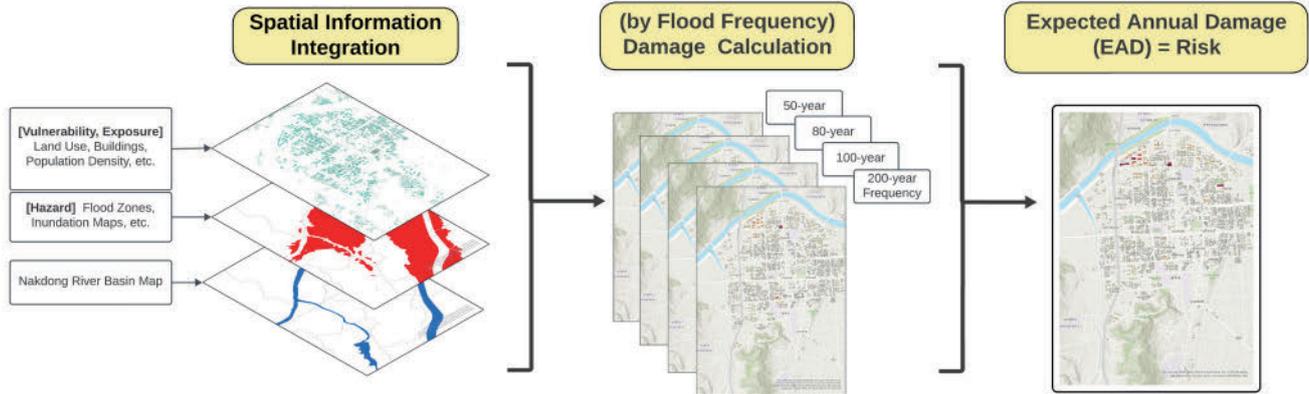


그림 2. 본 연구의 위험성(연간기대피해액) 산정 방법
Figure 2. Risk estimation method in this research

Table 1. Key data and sources

Key data	Source
Flood information (depth, area)	Flood maps (Ministry of Environment, 2022)
Residential assets (gross floor area, use, etc)	Building register (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2022)
Agriculture assets (area, type)	Farm map (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2022)
Vehicle assets (number of vehicle, type, etc)	Vehicle registration (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2022)
Population (vulnerable, general)	Resident population (Ministry of the Interior and Safety, 2022)
Industrial assets (number of employee, etc.)	National Business Survey (Statistics Korea, 2021)

교통부, 2022b)와 주민 인구 통계(행정안전부, 2022b)를 건축물 대장 정보상 건축물의 연면적을 기준으로 배분하여 건축물 단위의 공간 데이터로 구축하였다. 이에 따라 차량자산과 인구는 각각 건축물별로 주차된 차량 자산과 거주 인구를 의미한다. 산업 자산의 경우, 현행 산업시설별 자산 및 공간 데이터가 부재하여 수자원 부문의 예비타당성조사의 표준 지침(한국개발연구원, 2008)을 참고해 전국사업체조사(통계청, 2021)의 종사자 수 기반의 공간정보를 구축하였다(Table 1).

취약성(Vulnerability)은 노출된 자산과 인구가 홍수로 인해 피해를 입을 수 있는 정도를 나타낸다. 이는 자산의 물리적 특성, 사회경제적 요인, 재해 대응 능력 등에 의해 결정된다. 본 연구에서는 실증분석을 통해 추정된 피해함수를 자산별로 적용해 이러한 취약성을 고려하였다. 이와 같은 방식은 미국 연방재난관리청의 재해모형(HAZUS)을 비롯해 침수위험성 평가에서 일반적으로 활용되는 방법이다. 구체적으로, 적용한 피해함수의 모수는 국가의 홍수 피해 산정을 위해 작성된 최신 보고서(한국개발연구

원, 2019)를 준용하였다. 주거자산 피해는 주거건축물의 물리적 피해와 건축물 내 내용물 피해로 구분하여 각 항목에 대한 피해함수를 사용하였다(Table 2). 농업자산은 농작물 피해와 농경지 피해로 구분하였는데, 농작물 피해는 논, 밭 또는 과수·시설 등 세 가지 작물 유형에 따라 다른 피해함수를 적용하였다(Table 3). 동 피해함수는 1m 미만의 침수에 대해서는 농작물의 일부만 피해를 입는 것으로 가정하며(한국개발연구원, 2019), 농경지 피해의 경우 각 농경지의 침수 면적에 정부의 침수 면적별 피해보상액을 곱하여 피해액을 산정한다. 차량자산 피해는 소형차, 화물차, 대형차 등 세 가지 유형에 대해 각기 다른 피해 함수와 자산가치를 적용하였으며, 한국환경연구원(2023)에서 사용한 피해함수를 차용하였다(Table 4). 인명 피해는 취약 인구(5세 미만, 65세 초과)와 일반 인구(5~65세)로 구분하여 취약성을 반영하였다(Table 5). 인명 피해 계산식의 주요 변수로는 1인당 손실 평균비용을 3억 9천 3백

Table 2. Damage to buildings and building contents by inundation depth (Unit: %)

	Below 0.5 m	0.5 m~ 1.0 m	1 m~2 m	2 m~5 m	Above 5 m
Building damage	15	32	64	95	100
Building contents damage	15	33	51	95	100

Source: Korea Development Institute (2019)

Table 3. Crop damage by inundation depth (Unit: %)

	Below 1 m	Above 1 m
Paddy	27	100
Farm & Orchard	51	100
Greenhouse	31	100

Source: Korea Development Institute (2019)

Table 4. Asset value for each vehicle type and damage by inundation depth (Unit: thousand Korean won, %)

	Asset value	Inundation depth				
		Below 0.5 m	0.5 m~ 1 m	1 m~ 2 m	2 m~ 5 m	Above 5 m
Car	8,740	3.9	53.5	97.2	100	100
Van	11,241	1.3	34.8	91.4	100	100
Freight car	6,438	1.3	34.8	91.4	100	100

Source: Korea Environmental Institute (2023)

Table 5. Human damage by inundation depth (Unit: %)

	Below 1 m	Above 1 m
Vulnerable population	0.027887	0.087191
General population	0.011419	0.039543

Source: Korea Development Institute (2019)

86만 6천 원으로 가정하였으며, 이는 한국개발연구원(2019)의 기준을 따른 것이다. 마지막으로, 산업자산 피해는 유형자산과 재고자산으로 구분하여 산정하였으며, 피해함수는 한국개발연구원(2008)을 활용하였다(Table 6).

마지막으로, 위험성(Risk)은 상기 위험요인(Hazard), 노출성(Exposure), 취약성(Vulnerability)을 종합하여 산정되며, 구체적인 과정은 <Figure 2>와 같이 위험요인과 노출성을 공간적으로 중첩시키고, 취약성을 적용하여 피해액을 산정하는 방식을 사용하였다. 다만, 홍수로 인한 공간별(r) 위험성(피해액)은 확률적으로 발생하는 홍수의 특성상 홍수 사상 시나리오(f)에 따라 결정된다. 즉, 위험요인(Hazard)을 나타내는 홍수위험지도의 4개 홍수 빈도 시나리오(50년, 80년, 100년, 200년)별로 위험성이 결정되며, 일반적으로 빈도가 낮을수록(예: 200년 빈도) 더 넓은 침수 범위와 깊은 침수심으로 인해 위험성이 증가한다.

$$\text{피해액}_{r,f} = \text{주거자산피해}_{r,f} + \text{농업자산피해}_{r,f} + \text{차량자산피해}_{r,f} + \text{인명피해}_{r,f} + \text{산업자산피해}_{r,f} \quad (1)$$

홍수 사상 시나리오별 피해액은 각 시나리오의 발생 확률을 곱한 후 이를 적분하여 연간기대피해액(Expected Annual Damage,

Table 6. Industrial damage to property and inventory by inundation depth (Unit: %)

	0~0.5 m	0.5 m~ 1.0 m	1 m~ 2 m	2 m~ 3 m	Above 3 m
Property	23.2	45.3	78.9	96.6	100
Inventory	12.8	26.7	58.6	89.7	100

Source: Korea Development Institute (2008)

EAD)으로 계산할 수 있다(한국환경연구원, 2023). 연간기대피해액은 해당 지역에서 매년 예상되는 평균피해액을 의미하며, 이는 홍수 사상이 확률적이라는 점을 고려할 때 개별 시나리오별 피해액을 각각 산정하는 방식보다 위험성(Risk) 개념에 더 적합하다.

$$\text{연간기대피해액}_r = \int_f (\text{주거자산피해}_{r,f} + \text{농업자산피해}_{r,f} + \text{차량자산피해}_{r,f} + \text{인명피해}_{r,f} + \text{산업자산피해}_{r,f}) dx_f \quad (2)$$

연간기대피해액 산정 시, 빈도 구간별 연간 발생 확률(x_f)은 각 빈도(f)의 역수로 계산된다. 다만, 홍수위험지도에는 4개의 이산적 빈도만 존재하므로, 빈도별 피해액 값을 내삽하여 연속적인 함수로 변환하였다. 내삽 과정에서는 한국개발연구원(2019)과 한국환경연구원(2023)에 따라 높은 빈도에는 로그 함수를, 낮은 빈도에는 선형 함수를 각각 가정하여 적용하였다.

IV. 분석 결과

<Figure 3>은 본 연구의 분석 대상 지역인 낙동강 권역에 대한 침수 위험성을 시각적으로 나타낸 것이다. 이는 다섯 개 피해 항목에 대해 빈도별 예상 침수 피해액을 합산한 것으로, 공간별 연간기대피해액(EAD)을 의미한다. 본 그림은 근접한 지역이라도 침수에 대한 노출성(Exposure)과 취약성(Vulnerability)에 따라 매우 상이한 위험성(Risk)이 나타남을 보여준다.

이와 같은 위험성을 다섯 개 항목별로 상위 10개 지역에 대해 정량적으로 나타내면 <Table 7>과 같다. 주거 자산의 경우, 상위 9개 지역이 경상남도에 집중된 것을 확인할 수 있으며, 특히 밀양시와 김해시의 여러 지역이 포함되어 있다. 가장 많은 피해액이 추산된 경상남도 밀양시 하남읍의 경우 연간 약 127억 원의

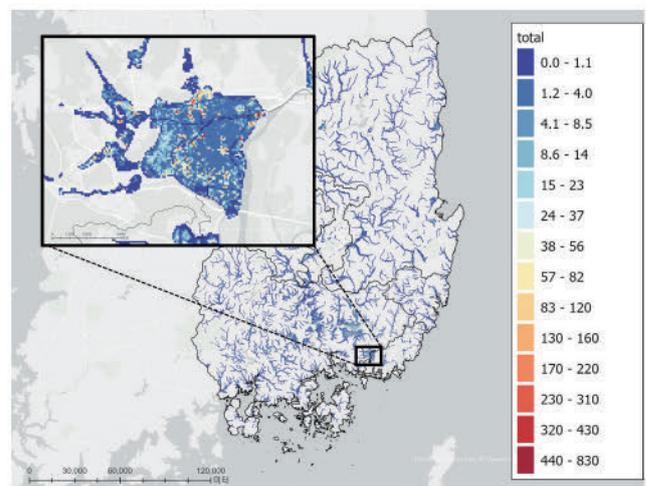


그림 3. 낙동강권역의 홍수위험성(단위: 백만 원)
Figure 3. Flood risk of the Nakdong River area (Unit: million Korean won)

표 7 자산별 연간기대피해액의 상위 10개 지역

(단위: 백만 원)

Table 7. Top 10 regions for annualised expected losses by asset

(Unit: million Korean won)

Region	Residential assets	Region	Agricultural assets
Hanam-eup, Miryang-si, Gyeongnam	12,751	Hanam-eup, Miryang-si, Gyeongnam	13,746
Samrangjin-eup, Miryang-si, Gyeongnam	11,008	Sangnam-myeon, Milyang-si, Gyeongnam	11,470
Daesan-myeon, Changwon-si, Gyeongnam	10,196	Yongam-myeon, Seongju-gun, Gyeongbuk	8,849
Gaya-eup, Haman-gun, Gyeongnam	9,691	Daesan-myeon, Changwon-si, Gyeongnam	8,592
Sangnam-myeon, Milyang-si, Gyeongnam	9,091	Okpo-eup, Dalseong-gun, Daegu	8,080
Pungsan-eup, Andong-si, Gyeongbuk	6,651	Okjong-myeon, Hadong-gun, Gyeongnam	7,621
Hwamok-dong, Gimhae-si, Gyeongnam	6,557	Seonnam-myeon, Seongju-gun, Gyeongbuk	5,130
Hallim-myeon, Gimhae-si, Gyeongnam	6,074	Seongju-eup, Seongju-gun, Gyeongbuk	5,056
Hapcheon-eup, Hapcheon-gun, Gyeongnam	5,573	Daegok-myeon, Jinju-si, Gyeongnam	4,762
Daedong-myeon, Gimhae-si, Gyeongnam	5,526	Daedong-myeon, Gimhae-si, Gyeongnam	4,627

Region	Industrial assets	Region	Life	Region	Vehicle
Jinyeong-eup, Gimhae-si, Gyeongnam	196	Jinyoung-eup, Gimhae-si, Gyeongnam	35	Jinyoung-eup, Gimhae-si, Gyeongnam	6,213
Gongdan-dong, Gumi-si, Gyeongbuk	103	Dong-myeon, Yangsan-si, Gyeongnam	35	Guji-myeon, Dalseong-gun, Daegu	5,038
Hallim-myeon, Gimhae-si, Gyeongnam	100	Nambu-dong, Yangsan-si, Gyeongnam	19	Dong-myeon, Yangsan-si, Gyeongnam	4,624
Seongju-eup, Seongju-gun, Gyeongbuk	92	Gaya-eup, Haman-gun, Gyeongnam	19	Bisan-dong, Seo-gu, Daegu	4,380
Buwon-dong, Gimhae-si, Gyeongnam	90	Yeonil-eup, Pohang-si, Gyeongbuk	16	Yangjeong-dong, Buk-gu, Ulsan	3,698
Bisan-dong, Seo-gu, Daegu	83	Sinsu-dong, Dong-gu, Daegu	14	Daesan-myeon, Changwon-si, Gyeongnam	3,483
Daecheon-dong, Dalseo-gu, Daegu	64	Jungbu-dong, Yangsan-si, Gyeongnam	11	Gaya-eup, Haman-gun, Gyeongnam	3,435
Yangjeong-dong, Buk-gu, Ulsan	62	Goa-eup, Gumi, Gyeongbuk	11	Yeonil-eup, Pohang-si, Gyeongbuk	3,289
Daesan-myeon, Changwon-si, Gyeongnam	61	Naei-dong, Milyang-si, Gyeongnam	10	Daecheon-dong, Dalseo-gu, Daegu	3,049
Gamjeon-dong, Sasang-gu, Busan	59	Muyang-dong, Sangju-si, Gyeongbuk	10	Hallim-myeon, Gimhae-si, Gyeongnam	2,538

침수 피해가 예상되며, 이는 주로 저지대에 밀집된 소규모 단독 주택에서 비롯된 것으로 분석된다. 주목할 만한 점은 위험성이 높은 지역이 하천 인근뿐만 아니라 하천에서 떨어진 내륙 지역도 포함한다는 것이다. 이는 침수 위험에 대한 노출도뿐만 아니라 취약성을 고려한 결과로 해석된다. 즉, 내륙에 위치한 주거 자산도 침수 위험에 노출될 경우 상당한 위험성을 가질 수 있음을 시

사한다(Figure 4).

농업 자산에 대한 위험성은 다섯 개 피해 항목 중 가장 큰 것으로 나타난다. 주로 하천 주변 경작지에서 발생하는 피해로, 분석 지역의 농산업 특성상 논보다는 시설(경북 성주 용암면, 경남 창원 대산면, 경남 하동 옥종면, 경북 성주 선남면, 경북 성주 성주읍)과 밭(경남 밀양 하남읍, 경남 밀양 상남면)에서 주로 발생하

는 것으로 평가된다. 경남 창원 대산면의 경우, 침수 면적 기준으로는 논이 노출도가 더 크지만, 시설의 단위면적당 생산비(자산가치)가 논보다 높아 시설 피해가 크게 평가된다. 이 역시 위험성을 구성하는 취약성(Vulnerability)의 중요성을 시사한다(Figure 5). 차량 자산의 침수 위험성도 상당한 규모로 평가된다. 지역별로 살펴보면, 주거 자산 및 농업 자산과는 달리, 차량 자산이 밀집된 도시 지역이 피해액 기준 상위권에 위치한 것을 확인할 수 있다. 구체적으로, 경남 김해시 진영읍과 경남 양산시 동면에 위치한 신도시 지역은 각각 주천강, 화포천, 양산천 인근에 위치해 있어 상당한 침수 피해가 발생할 가능성이 높은 것으로 나타났으며, 대구, 창원, 울산, 포항 등 낙동강 권역의 주요 도시에서도 높은 차량 자산 가치로 인해 위험성이 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 차량 자산이 밀집한 도시 지역은 침수 발생 가능성(Exposure)이 낮더라도 높은 차량 자산 가치(Vulnerability)로 인하여

위험성이 높을 수 있음을 시사한다(Figure 6).

인명에 대한 위험성은 다른 항목과 비교하여 상대적으로 낮게 평가된다. 차량 자산의 위험성과 비교했을 때, 전체적인 위험성이 낮은 뿐만 아니라 위험 지역도 상당히 상이하여 특히 도시에서의 인명 피해 위험성이 크지 않은 것으로 분석된다. 이는 침수 위험에 노출된 차량 자산과 인구의 차이에서 기인한 것으로 보인다. 차량 자산은 주로 1층 혹은 지하에 위치하여 침수 시 모든 차량이 위험에 노출되는 반면, 아파트와 같은 공동주택은 1층 혹은 저층 거주자만 위험에 노출되기 때문에 인명의 침수 위험성은 차량 자산의 위험성보다 낮게 평가될 수 있다. 또한, 인명 피해는 주로 도시보다는 지역사회에서 발생하는 것으로 나타났는데, 이는 지역사회의 취약 인구 비율이 도시보다 더 높기 때문으로 해석된다. 본 연구에서는 인구를 취약 인구와 일반 인가로 구분하여 분석하였으며, 이에 따라 취약성이 상이하게 나타난다(Figure 7).

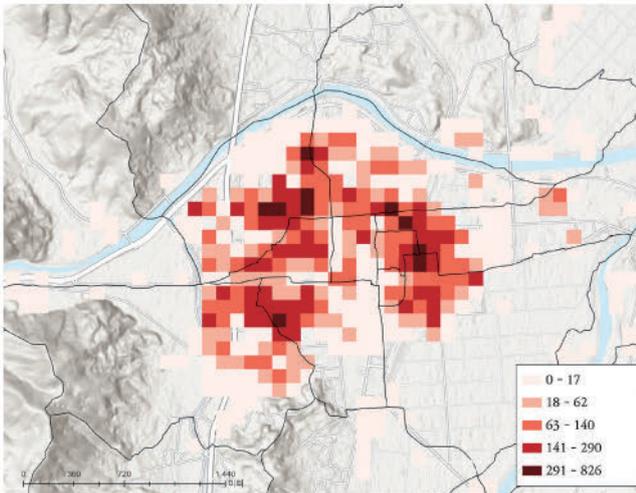


그림 4. 경상북도 상주시 서문동 일대 주거자산 피해액(단위: 백만 원)
Figure 4. Damage to residential assets in Seomun-dong, Sangju-si, Gyeongsangbuk-do (Unit: million Korean won)

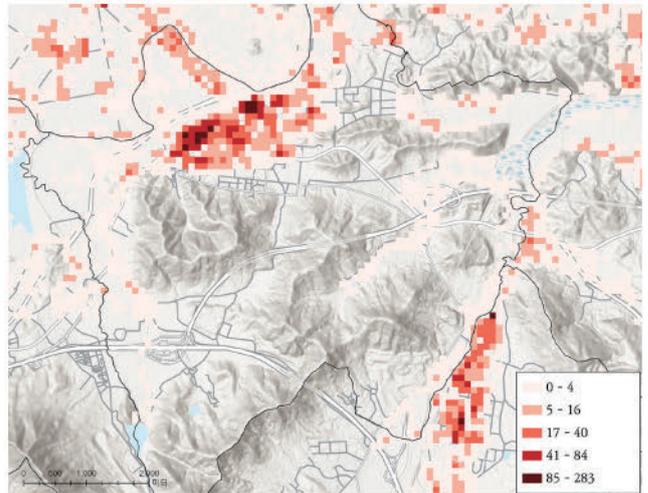


그림 6. 경상남도 김해시 진영읍 일대 차량피해액(단위: 백만 원)
Figure 6. Damage to vehicles in Jinjeong-eup, Gimhae, Gyeongsangnam-do (Unit: million Korean won)

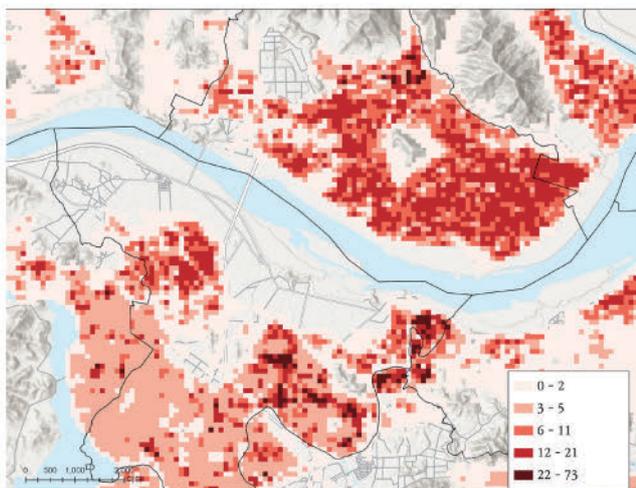


그림 5. 경상남도 밀양시 하남읍 일대 농업자산 피해액(단위: 백만 원)
Figure 5. Damage to agricultural assets in Hanam-eup, Miryang-si, Gyeongsangnam-do (Unit: million Korean won)

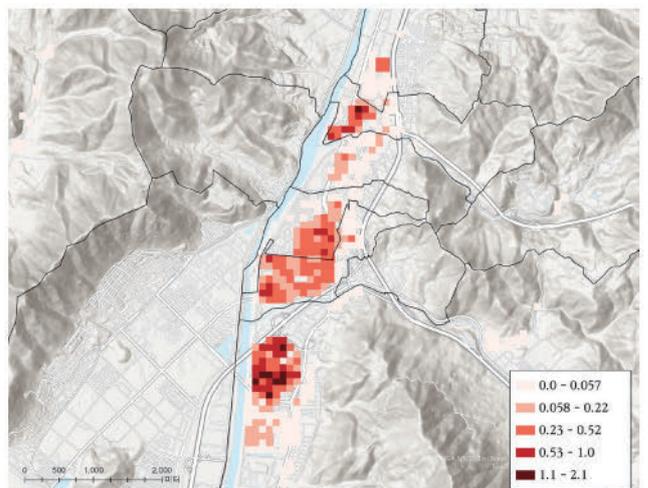


그림 7. 경상남도 양산시 남부동 일대 인명피해액(단위: 백만 원)
Figure 7. Loss of life in Nambu-dong, Yangsan-si, Gyeongsangnam-do (Unit: million Korean won)

산업 자산의 경우 주로 산업단지 및 농공단지에서 대규모의 위험성이 발견되었다. 이는 산업 자산이 많은 데서 기인한 것으로, 구체적으로 경상남도 김해시 진영읍은 여러 산업단지에서 연간 약 1억 7백만 원의 침수 피해가 예상되는 것으로 추정되었다.

V. 요약 및 시사점

수재해로 인한 피해는 우리나라의 자연재해 관련 피해 중 가장 큰 비중을 차지하며, 특히 인명과 경제 자산이 집중된 도시의 경우 홍수 발생 시 위험성이 더욱 크다. 기후변화로 인해 집중호우와 태풍의 빈도 및 강도 증가가 예측되는 상황에서, 홍수로 인한 침수 피해는 도시와 지역 사회가 장기적으로 대비하고 관리해야 할 주요 문제로 부각되고 있다.

본 연구는 국내에서 가장 큰 권역인 낙동강 권역(지방하천)을 대상으로 위험요인(Hazard), 노출성(Exposure), 취약성(Vulnerability) 등 세 가지 요소를 모두 고려하여 위험성(Risk)을 정량적으로 산정하였다. 이를 위해 홍수위험지도(환경부, 2022), 건축물대장 정보(국토교통부, 2022a), 팜맵(농림축산식품부, 2022), 전국산업체조사(통계청, 2021), 주민등록 인구통계(행정안전부, 2022b), 자동차등록통계(국토교통부, 2022b) 등 다양한 국가 공식 통계 자료를 기반으로 다섯 가지 피해 항목(주거용 건물 자산, 농업 자산, 산업 자산, 인명, 차량 자산)에 대해 연간기대피해액을 평가하였다. 특히 객체 단위(개별 건축물, 개별 농경지 등)로 홍수 위험성을 평가하여 국지적으로 발생하는 피해 양상이 지역별로 매우 상이한 홍수 피해의 특성을 반영하였다.

낙동강 권역을 대상으로 한 분석 결과에 따른 재난 관리 및 국토 계획적 시사점은 다음과 같다. 첫째, 본 연구 결과는 통합적인 홍수 위험 관리의 필요성을 강조한다. 위험성은 위험요인(Hazard)뿐만 아니라 노출성(Exposure)과 취약성(Vulnerability)에 의해 결정되며, 분석 결과 취약성이 위험성을 구성하는 주요 요인임을 확인하였다. 예를 들어, 주거 부문의 침수 위험성이 높은 지역은 하천 인근의 노출성이 높은 지역뿐만 아니라 내륙 지역의 취약성이 높은 지역도 포함하며, 이는 내륙 지역이라도 높은 수준의 방재 계획이 필요함을 보여준다. 따라서 국토 계획 수립 시 재해 노출뿐만 아니라 사회·경제적 특성을 반영하여 재난으로부터 안전한 도시 환경을 조성하는 것이 중요할 것이다.

둘째, 낙동강 권역의 경우 경상남도의 주거 지역, 특히 저지대에 밀집된 소규모 단독주택 지역에 대한 홍수 예방 대책이 우선적으로 추진되어야 할 것이다. 해당 지역은 상당히 높은 홍수 위험성을 지닌 지역으로, 연간 예상되는 피해액(EAD)이 높은 것으로 분석되었다. 이에 따라 국토 계획 측면에서 해당 지역에 대한 물리적인 침수 방어 시설의 설치, 건축물의 내수 침수 방지 설계 기준 강화 등이 필요하며, 토지 이용 계획을 재검토하여 이와 같은 위험 지역의 개발을 제한하거나 주거 환경을 개선함으로써 수재

해의 위험성을 저감해야 할 것이다.

셋째, 농업 자산은 다섯 개 항목 중 가장 높은 위험성을 보였으며, 이는 홍수 발생에 따른 경작지와 농산물의 피해 위험이 크다는 기존의 시각을 재확인하는 것이다. 특히 낙동강 권역에서는 시설과 밭에 수재해 피해가 집중될 것으로 예상되었다. 본 연구에서는 사회·경제적 파급 효과를 포함한 간접 피해는 고려하지 않았는데, 농산물은 필수재일 뿐만 아니라 대규모 후방 산업이 존재함을 감안할 때, 간접 피해까지 고려한 실제 농업 자산의 홍수 위험성은 더욱 클 것으로 판단된다. 이러한 측면에서, 홍수 피해로부터 농업 자산을 보호하기 위한 국토 계획이 매우 중요하며, 이와 동시에 위험성이 높은 농업 지역에 대한 제방 강화, 배수로 정비, 홍수 예보 및 경보 시스템 구축 등의 홍수 관리 방안이 마련되어야 할 것이다.

넷째, 지난 2022년 여름 수도권 홍수 사태에서도 관찰되었듯이 저층 혹은 지하에 위치한 차량 자산은 높은 홍수 위험성을 보이며, 이러한 점을 반영하여 도시 계획 시 주차 시설의 위치와 설계 기준을 재검토할 필요가 있을 것이다. 특히, 주차장의 침수 방지 대책을 강화하고, 홍수 위험 지역에서는 지하 주차장 대신 지상 주차장이나 고가 주차 시설을 고려하는 등 차량 자산의 보호를 위한 다양한 전략이 고려되어야 할 것이다. 또한, 홍수 예보 시 차량 대피 계획 수립 등도 도시 교통 계획에 고려될 필요가 있다.

마지막으로, 향후 국토 계획 수립 시 본 연구에서와 같이 홍수 위험지도와 다양한 사회·경제 정보를 활용하여 상세한 공간 단위에서의 재해 위험성을 파악하고 이를 국토 계획에 반영하는 노력이 필요하다. 기후변화로 인해 홍수 등 자연재해의 빈도와 강도가 증가할 것으로 예상되는 만큼, 국토 계획 단계에서 노출성과 취약성을 나타내는 다양한 공간 정보를 통합하여 재해에 대비한 지속 가능한 도시를 구축해야 할 것이다.

본 연구는 몇 가지 한계점을 지니고 있다. 첫째, 다섯 가지 피해 항목만을 대상으로 위험성 평가를 수행하였으며, 이외의 위험성(공공 건축물, 사회 인프라, 간접 피해 등)에 대해서는 평가하지 않아 과소평가의 편향이 발생할 수 있다. 또 다른 과소평가 요인으로, 본 위험성 평가는 지방하천의 범람에 따른 침수만을 고려하였으며, 국가하천 범람이나 내수 침수로 인한 피해는 평가하지 않았다. 이 역시 과소평가 요인으로, 실제 홍수 위험성(피해액)은 본 연구에서 추정된 규모보다 클 수 있다. 마지막으로, 다양한 사회·경제·공간 데이터를 함께 활용함에 따라 각 데이터가 지닌 관측 오차로 인해 편향이 발생할 수 있음을 밝힌다.

주1. 회귀 모형을 통한 홍수 피해액 산정은 홍수로 인해 발생할 수 있는 각종 자산에 대한 피해 합수를 개발하는 데 활용될 수 있다.

주2. 본 연구에서는 위험성(Risk)을 예상 피해액(Expected Damage)과 동일한 개념으로 정의하며, 이를 바탕으로 모든 공간에 대해 정량적으로 연간기대피해액(Expected Annual Damage; EAD)을 평가한다.

- 주3. 나유경·최진무(2019) 또한 개별 건축물별 피해액을 산정하였으나, 본 연구는 농업 자산, 차량 자산 등 다섯 개 피해 항목에 대해 상세한 공간 단위의 피해액을 산정하였다. 또한 울산광역시만을 대상으로 한 나유경·최진무(2019)와 달리, 본 연구는 5개 광역자치체(울산, 부산, 대구, 경상북도, 경상남도)를 포함한 낙동강 권역을 대상으로 하여 더 넓은 공간 범위를 분석한 점에서 차별성을 갖는다.
- 주4. 4개 홍수 빈도에 대한 침수 정보가 제공되는 지방하천 홍수위험지도와는 달리 국가하천 대상 홍수위험지도는 1개 혹은 2개 홍수 빈도에 대한 정보만 제공된다. 본 연구는 빈도별 침수위험성이 아닌 빈도별 확률을 고려한 기대피해액(expected damage)을 평가하며, 1개 혹은 2개 홍수 빈도 침수 정보만을 대상으로 할 경우 계산된 기댓값의 편향이 커질 수 있다. 이에 따라 국가하천은 포함하지 않았다.
- 주5. 기존의 다차원 피해산정법에서 공공시설물 피해는 일반 자산 피해액에 일정한 계수를 곱하는 간단한 방식으로 산정하고 있으며 이는 향후 개선이 필요한 항목이다(한국개발연구원, 2019).

인용문헌
References

1. 건설교통부, 2001. 「치수사업 경제성 분석 개선방안 연구」, 과천. Ministry of Construction & Transportation, 2001. *Study on the Economic Analysis in Flood Control Projects*, Gwacheon.
2. 건설교통부, 2004. 「치수사업 경제성분석 방법연구」, 과천. Ministry of Construction & Transportation, 2004. *A Study on the Economic Analysis in Flood Control Projects*, Gwacheon.
3. 국토교통부, 2020. 「대한민국 국가지도집 II」, 세종. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2020. *The National Atlas of Korea II*, Sejong.
4. 기상청, 2021. 「우리나라 109년(1912~2020년) 기후변화 분석 보고서」, 서울. Korea Meteorological Administration, 2021. *Climate Change Analysis Report for 109 Years (1912-2020) in Korea*, Seoul.
5. 김동욱·김지은·장초록·장문엽, 2021. “사회·경제적 인자를 고려한 우리나라의 폭염 취약성 평가”, 「한국방재학회 논문집」, 21(5): 39-47. Kim, D.W., Kim, J.E., Jang, C.R., and Jang, M.Y., 2021. “Assessment of Heatwave Vulnerability in Korea Considering Socio-economic Indices”, *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, 21(5): 39-47.
6. 김지은·박지연·이주현·김태웅, 2019. “주성분 분석 및 엔트로피 기법을 적용한 사회·경제적 가뭄 취약성 평가”, 「한국수자원학회 논문집」, 52(6): 441-449. Kim, J.E., Park, J.Y., Lee, J.H., and Kim, T.W., 2019. “Socio-economic Vulnerability Assessment of Drought Using Principal Component Analysis and Entropy Method”, *Journal of Korea Water Resources Association*, 52(6): 441-449.
7. 나유경·최진무, 2019. “객체기반법을 이용한 침수피해액 추정 방안 연구”, 「대한지리학회지」, 54(6): 637-649. Na, Y.G. and Choi, J.M., 2019. “A Study on the Flood Damage Estimation Using Object-based Analysis”, *Journal of the Korean Geographical Society*, 54(6): 637-649.
8. 박정기·조기성·이근상, 2015. “GIS 기반의 구리시 홍수피해액 산정”, 2015 한국지형공간정보학회 춘계학술대회, 서울. Park, J.G., Cho, G.S., and Lee, G.S., 2015. “Evaluation of Flood Damage Assessment of Guri City based on GIS”, Paper presented at the 2015 Korean Spatial Information Society Spring Academic Conference, Seoul.
9. 서울특별시, 2021. 「2040 서울특별시 물순환회복 기본계획」, 서울. Seoul Metropolitan Government, 2021. *2040 Seoul Water Cycle Recovery Master Plan*, Seoul.
10. 신지예·임성민·김중훈·김태웅, 2014. “내수침수시나리오와 침수피해곡선을 활용한 도시지역 내수침수피해특성 분석”, 「한국방재학회논문집」, 14(1): 291-305. Shin, J.Y., Im, S.M., Kim, J.H., and Kim T.W., 2014. “Analysis of Urban Flood Damage Characteristics Using Inland Flood Scenarios and Flood Damage Curve”, *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, 14(1): 291-305.
11. 이근상·박진혁, 2011. “GIS 자료와 연계한 시나리오별 홍수피해액 분석”, 「대한공간정보학회지」, 19(4): 71-80. Lee, G.S. and Park, J.H., 2011. “Flood Damage Assessment According to the Scenarios Coupled with GIS Data”, *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, 19(4): 71-80.
12. 이근상·박정기·조기성, 2014. “공간정보와 연계한 홍수지역 경제적 피해 산정 방안”, 2014 한국지적정보학회 & 서울특별시 공동 추계학술대회, 서울. Lee, G.S., Park, J.G., and Cho, G.S., 2014. “The Assessment Plan of Economic Damage in Flooding Area with Geospatial Information”, Paper presented at the 2014 The Korean Cadastre Information Association & Seoul Metropolitan Government Joint Fall Conference, Seoul.
13. 이병재, 2014. “도시계획적 대책을 활용한 기후변화 재해 예방”, 「환경논총」, 54: 4-12. Lee, B.J., 2014. “Using Urban Planning Measures to Prevent Climate Change Disasters”, *Journal of Environmental Studies*, 54: 4-12.
14. 이종소·어규·최창현·정재원·김형수, 2016. “비선형 회귀식을 이용한 강우-홍수피해액 추정함수 개발”, 「한국재난정보학회 논문집」, 12(1): 74-88. Lee, J.S., Eo, G., Choi, C.H., Jung, J.W., and Kim, H.S., 2016. “Development of Rainfall-Flood Damage Estimation Function using Nonlinear Regression Equation”, *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, 12(1): 74-88.
15. 이충성·최승안·심명필·김형수, 2006. “GIS기반의 분포형 홍수 피해산정 기법”, 「대한토목학회논문집 B」, 26(3B): 301-310. Yi, C.S., Choi, S.A., Shim, M.P., and Kim, H.S., 2006. “GIS Based Distributed Flood Damage Assessment”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers B*, 26(3B): 301-310.
16. 임지은, 2019. “다차원법과 다중회귀분석 기반 홍수피해액 산정에 관한 연구 평창강 유역을 대상으로”, 인하대학교 석사학위논문. Lim, J.O., 2019. “Estimation of Flood Damage Based on Multi-Dimensional Flood Damage Assessment and Multiple Regression Analysis: A Case Study for the Pyeongchang River Basin”, Master’s Thesis, Inha University.

17. 최창현·김종성·이명진·김정환·이우주·김형수, 2017. “주성분 분석과 로지스틱 회귀모형을 이용한 호우피해 예측함수 개발”, 『한국방재학회논문집』, 17(6): 159-166.
Choi, C.H., Kim, J.S., Lee, M.J., Kim, J.H., Lee, W.J., and Kim, H.S., 2017. “Development of Heavy Rain Damage Prediction Function Using Principal Component Analysis and Logistic Regression Model”, *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, 17(6): 159-166.
18. 최천규, 2017. “홍수피해 영향인자 평가 및 손상함수 개발: 주거 건물 및 건물내용물 중심으로”, 인하대학교 대학원 박사학위논문.
Choi, C.K., 2017. “Evaluation of Flood Impact Variables and Development of Flood Damage Function: Case Study for Residential Buildings and Contents”, Ph. D. Dissertation, Inha University.
19. 탁용훈·김영도·강부식·박문현, 2017. “도시지역 침수피해액 산정을 위한 다차원법 적용”, 『한국수자원학회논문집』, 50(6): 397-405.
Tak, Y.H., Kim, Y.D., Kang, B.S., and Park, M.H., 2017. “Application of Multi-dimensional Flood Damage Analysis in Urban Area”, *Journal of Korea Water Resources Association*, 50(6): 397-405.
20. 한국개발연구원, 2008. 「수자원부문사업의 예비타당성조사 표준 지침 수정·보완 연구(제4판)」, 세종.
Korea Development Institute, 2008. *Revised and Supplementary Study to the Standard Guidelines for Pre-Feasibility Studies for Water Sector Projects (4th Edition)*, Sejong.
21. 한국개발연구원, 2019. 「홍수피해 경감편익 산정을 위한 다차원법 적용기준에 관한 연구」, 세종.
Korea Development Institute, 2019. *A Study on the Application of Multidimensional Methods to Estimate the Benefits of Flood Damage Mitigation*, Sejong.
22. 한강홍수통제소, 2021. 「2020년 하천유역조사 통계분석보고서」, 서울.
Han River Flood Control Office, 2021. *Statistical Analysis Report on River Basin Survey*, Seoul.
23. 한국환경연구원, 2022. 「기후변화 대응을 위한 홍수위험평가 및 홍수방어기준 전략 마련 연구(I)」, 세종.
Korea Environment Institute, 2022. *Analysis on Establishment of Strategies for Flood Risk Evaluation and Flood Defense Criteria against Climate Change(I)*, Sejong.
24. 한국환경연구원, 2023. 「기후변화 대응을 위한 홍수위험평가 및 홍수방어기준 전략 마련 연구(II)」, 세종.
Korea Environment Institute, 2022. *Analysis on Establishment of Strategies for Flood Risk Evaluation and Flood Defense Criteria against Climate Change(II)*, Sejong.
25. 행정안전부, 2022a. 「2021년 재해연보」, Sejong.
Ministry of the Interior and Safety, 2022a. *2021 Disaster Annual Report*, Sejong.
26. Chen, A.S., Hammond, M.J., Djordjević, S., Butler, D., Khan, D.M., and Veerbeek, W., 2016. “From Hazard to Impact: Flood Damage Assessment Tools for Mega Cities”, *Natural Hazards*, 82(2): 857-890.
27. Dutta, D., Herath, S., and Musiak, K., 2003. “A Mathematical Model for Flood Loss Estimation”, *Journal of Hydrology*, 277(1-2): 24-49.
28. Emergency Management Institute, 2003. *A Citizen's Guide to Disaster Assistance*, FEMA.
29. Goda, K. and De Risi, R., 2018. “Multi-hazard Loss Estimation for Shaking and Tsunami Using Stochastic Rupture Sources”, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28: 539-554.
30. Green, C., Viavattene, C., and Thompson, P., 2011. *Guidance for Assessing Flood Losses - CONHAZ Report*, UK: Flood Hazard Research Centre - Middlesex University.
31. Hajat, S., Ebi, K.L., Kovats, R.S., Menne, B., Edwards, S., and Haines, A., 2005. “The Human Health Consequences of Flooding in Europe: A Review”, In *Extreme Weather Events and Public Health Responses*, edited by Kirch, W., Bertollini, R., and Menne, B., 185-196, Berlin: Springer.
32. Hallegatte, S., Patmore, N., Mestre, O., Dumas, P., CorfeeMorlot, J., Herweijer, C., and Muir-Wood, R., 2011. “Assessing Climate Change Impacts, Sea Level Rise and Storm Surge Risk in Port Cities: A Case Study on Copenhagen”, *Climatic Change*, 104: 113-137.
33. Hammond, M.J., Chen, A.S., Djordjevi, S., Butler, D., and Mark, O., 2015. “Urban Flood Impact Assessment: A State-of-the-art Review”, *Urban Water Journal*, 12(1): 14-29.
34. Harris, A.M., Chowdhury, F., Begum, Y.A., Khan, A.I., Faruque, A.S., Svennerholm, A.M., Harris, J.B., Ryan, E.T., Cravioto, A., Calderwood, S.B., and Qadri, F., 2008. “Shifting Prevalence of Major Diarrheal Pathogens in Patients Seeking Hospital Care during Floods in 1998, 2004, and 2007 in Dhaka, Bangladesh”, *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 79(5): 708-714.
35. IPCC, 2007. *Climate Change 2007 - Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, UK: Cambridge University Press.
36. IPCC, 2014. *Climate Change 2014 - Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part B: Regional Aspects: Volume 2, Regional Aspects: Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report*, UK: Cambridge University Press.
37. Jonkman, S.N., Bočkarjova, M., Kok, M., and Bernardini, P., 2008. “Integrated Hydrodynamic and Economic Modelling of Flood Damage in the Netherlands”, *Ecological Economics*, 66(1): 77-90.
38. Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., and Thielen, A., 2010. “Review Article “Assessment of Economic Flood Damage””, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10: 1697-1724.
39. Messner, F., Green, C., Meyer, V., Tunstall, S., and van der Veen, A., 2007. *Evaluating Flood Damages: Guidance and Recommendations on Principles and Methods*, Wallingford, UK: FLOOD-Site Consortium.
40. Meyer, V., Becker, N., Markantonis, V., Schwarze, R., van den Bergh, J.C.J.M., Bouwer, L.M., Bubeck, P., Ciavola, P., Genovesi, E., Green, C., Hallegatte, S., Kreibich, H., Lequeux, Q., Logar, I., Papyrakis, E., Pflutscheller, C., Poussin, J., Przulski, V., Thielen, A.H., and Viavattene, C., 2013. “Review Article: Assessing the Costs of Natural Hazards - State of the Art and

Knowledge Gaps”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(5): 1351-1373.

41. Rajkhowa, S. and Sarma, J., 2021. “14-Climate Change and Flood Risk, Global Climate Change”, *Global Climate Change*, 321-339.

42. Rose, A. and Lim, D., 2002. “Business Interruption Losses from Natural Hazards: Conceptual and Methodological Issues in the Case of the Northridge Earthquake”, *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 4(1): 1-14.

43. Rosenzweig, B., Montalto, F.A., Orton, P., Kaatz, J., Maher, N., Kleyman, J., Chen, Z., Sanderson, E., Adhikari, N., McPhearson, T., and Herreros-Cantis, P., 2024. “NPCC4: Climate Change and New York City’s Flood Risk”, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1539(1): 127-184.

44. Scawthorn, C., Flores, P.J., Blais, N.C., Seligson, H.A., Tate, E., Chang, S.E., Mifflin, E.R., Thomas, W., Murphy, J.M., Jones, C., and Lawrence, M.J., 2006. “HAZUS-MH Flood Loss Estimation Methodology. II. Damage and Loss Assessment”, *Natural Hazards Review*, 7(2): 72-81.

45. Tariq, M.A.U.R., Farooq, R., and Van de Giesen, N., 2020. “A Critical Review of Flood Risk Management and the Selection of Suitable Measures”, *Applied Sciences*, 10(23): 8752.

46. 국토교통부, 2022a. “건축물대장 정보”, <https://www.hub.go.kr/portal/main.do>
MOLIT, 2022a. “Building Register”, <https://www.hub.go.kr/portal/main.do>

47. 국토교통부, 2022b. “자동차등록통계”, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=116&tblId=DT_MLT-M_5498&conn_path=I2

MOLIT, 2022b. “Vehicle Registration”, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=116&tblId=DT_MLT-M_5498&conn_path=I2

48. 농림축산식품부, 2022. “팜맵”, <https://agis.epis.or.kr/ASD/main/intro.do>
MAFRA. 2022. “Farm Map”, <https://agis.epis.or.kr/ASD/main/intro.do>

49. 통계청, 2021. “전국산업체조사”, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1K52C08&conn_path=I2
KOSTAT, 2021. “National Business Survey”, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1K52C08&conn_path=I2

50. 행정안전부, 2022b. “주민등록 인구통계”, <https://www.data.go.kr/data/15099158/fileData.do>
Ministry of the Interior and Safety. 2022b. “Resident Population”, <https://www.data.go.kr/data/15099158/fileData.do>

51. 환경부, 2022. “홍수위험지도”, <https://www.floodmap.go.kr/region/regionList.do>
Ministry of Environment, 2022. “Flood maps”, <https://www.floodmap.go.kr/region/regionList.do>

52. NSSL (NOAA National Severe Storms Laboratory), 2023. “Severe Weather 101: Flood Basics”, <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/>

Date Received	2024-06-10
Reviewed(1 st)	2024-08-05
Date Revised	2024-10-18
Reviewed(2 nd)	2024-11-15
Date Revised	2024-11-20
Reviewed(3 rd)	2024-12-05
Date Accepted	2024-12-05
Final Received	2024-12-16