

도시하천유역의 홍수위험순위 결정을 위한 격자단위 홍수위험도 평가

이 하 늘¹ · 김 동 현² · 백 선 욱¹ · 이 준 학³ · 김 수 전^{4*}

¹인하대학교 스마트시티공학과 박사과정

²인하대학교 수자원시스템연구소 박사

³인하대학교 스마트시티공학과 석사과정

^{4*}인하대학교 사회인프라공학과 교수

Grid-based Flood Risk Assessment to Determine Flood Risk Ranking in Urban River Basins

Haneul Lee¹ · Donghyun Kim² · Seonuk Baek¹ · Joonhak Lee³ · Soojun Kim^{4*}

¹Doctor's Course, Department of Smart City Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

²Doctor, Institute of Water Resources System, Inha University, Incheon 22212, Korea

³Master's Course, Department of Smart City Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

^{4*}Professor, Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

[요 약]

도시유역의 침수피해를 예방하기 위하여 각 지자체에서는 재해예방사업을 수행하고 있다. 각 지자체가 재해예방사업에 투자할 수 있는 금액은 한정적이기 때문에 홍수에 대한 위험도가 높은 지역을 선별하여 예산을 효과적으로 투자하는 것이 필요하다. 홍수 위험도 평가는 사회 인문학적 특성과 수문학적 특성을 복합적 요인들을 고려하여 평가하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 수문학적 기반의 홍수 위험지도를 활용하여 피해발생가능 지역을 선별하였으며, 사회 인문학적 요인들을 고려하기 위하여 격자단위 세부 지표들을 수집하였다. 최종적으로 홍수위험순위 결정을 위하여 복합적 요인들을 고려한 격자단위 홍수 위험도 평가를 하였으며, 이를 통해 홍수 위험지역에 대한 투자 계획을 효과적으로 수립할 수 있을 것이라 판단된다.

[Abstract]

To mitigate flood damage, each local government is establishing a disaster prevention project. Given the constrained financial resources available to each local government for disaster prevention initiatives, it is imperative to judiciously allocate these resources by identifying high-risk flood-prone areas and optimizing budget utilization. The flood risk assessment necessitates the consideration of multifaceted factors, encompassing both humanistic and hydrological characteristics. In this study, we utilize a hydrology-based flood risk map to identify areas prone to flood damage and consider social and humanistic factors by collecting grid-based data. Ultimately, a grid-based flood risk assessment, considering these complex factors, is conducted to determine flood risk rankings. It is believed that through this comprehensive approach, an effective investment plan for flood-prone areas can be developed.

색인어 : 격자단위, 도시침수지도, 도시하천유역, 하천범람지도, 홍수 위험도

Keyword : Grid Based, Urban Flood Map, Urban River Basin, River Flood Map, Flood Risk

<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2023.24.11.2919>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 15 September 2023; **Revised** 25 September 2023

Accepted 26 September 2023

***Corresponding Author; Soojun Kim**

Tel: +82-32-876-9783

E-mail: sk325@inha.ac.kr

1. 서론

산업혁명 이후 다량의 온실가스가 대기 중으로 배출됨에 따라 지표온도가 상승하게 되었으며 이로 인해 지구온난화 현상이 발생하고 있다. 지구온난화 현상은 집중호우 및 태풍을 야기하였으며 전 세계는 홍수로 인한 피해가 발생하고 있다. 전 세계적으로 1995년부터 2015년 사이에 홍수로 인하여 750억 달러의 피해가 발생하였으며 1억 900만 명의 인명 피해가 발생하였다[1],[2]. 국내의 경우 2020년에는 홍수로 인하여 1조 2천억 원의 피해가 발생하였으며, 최근에는 강남역 일대, 부산 지하차도가 침수되는 등 도시지역에서 침수가 발생하는 사례가 증가하고 있다. 도시지역의 경우 도로 및 주차장과 같은 불 투수면적이 차지하는 비율이 높기 때문에 배수에 불리한 조건을 가지고 있으며 그로인해 도로 유실 및 지하공간의 침수피해가 발생하고 있다[3],[4]. 이러한 침수피해를 저감하기 위하여 홍수에 대한 위험도가 높은 지역과 과거 침수가 발생했던 지역을 선별하여 관리하고 있으며, 해당 지역에 대한 홍수피해 경감을 위하여 구조적 및 비구조적 대책을 수립하여 홍수피해 저감에 대한 예산을 투자하고 있다. 하지만, 구조적 및 비구조적 홍수방어 대책을 수립하기 위한 예산은 한정적이기 때문에 홍수에 대한 위험도가 높은 지역을 선별하여 예산을 효과적으로 투자하는 것이 필요하다. 따라서 홍수에 대한 위험도가 높은 지역을 평가하기 위하여 해당 지역의 인구, 건축물 등의 인문학적 특성과 홍수를 유발할 수 있는 강우특성을 복합적으로 고려하여 홍수에 대한 위험도를 평가하는 연구들이 이뤄지고 있다.

홍수 위험도 평가의 경우 홍수 위험에 대한 복합적 요인을 고려하기 위하여 다양한 평가 지수들을 선정하고 지수에 해당하는 지표들을 수집하여 위험도 평가를 수행하는 지표기반의 평가 기법이 활용되고 있다. OECD(Organisation for Economic Co-operation and Development)에서는 홍수 위험도를 평가하기 위하여 홍수 위험도 평가 지수를 PSR(Pressure-State-Response) 구조체계로 평가하는 방법을 제시하였다[5]. PSR은 압력지수(PI), 상태지수(SI), 대책지수(RI)의 평가 지수들이 구성되고 각 지수에 따라 세부 평가 지표들이 구성되어 지며 최종적으로 지수들을 조합하여 홍수 위험지수(FRI; Flood Risk Index)가 도출된다[6]-[8]. 전국의 지수특성을 평가하기 위하여 PSR 모형을 활용하였으며, 홍수피해 원인(Pressure)과 피해현황(State), 홍수피해 저감을 위한 노력(Response)의 세부 지표들을 선정하였다. 이들의 인과관계를 분석하여 각 구역의 홍수위험지수를 산정하였다[9]. 낙동강 유역의 방재대책 수립을 위하여 시군구 단위의 홍수위험지수를 산정하였다. PSR 모형의 홍수지수에 따라 각 세부지표들을 구성하였으며, 각 세부지표는 T-Score방법을 이용하여 표준화를 수행하였고 지표들 간의 가중치 산정을 위하여 엔트로피 가중치를 적용하였다[10]. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 홍수피해를 유발할 수 있는 기후요인을 나타내는 기후노출(Exposure),

기후노출에 대한 영향을 받는 규모를 나타내는 민감도(Sensitivity), 기후노출에 대한 피해를 저감하는 능력을 나타내는 적응도(Adaptive capacity)를 복합적으로 고려할 수 있는 취약성 모형을 제시하였다[11]. 도심 내부의 지역별 홍수 대응, 관리 및 예방 정책을 수립하기 위하여 IPCC 취약성 모형을 기반으로 서울시 행정동 단위별로 기후요인, 민감도, 적응도의 세부지표들을 선정하여 홍수 취약성 분석을 수행하였다[12]. 서울특별시 자치구 별 특성을 반영한 홍수취약성 분석을 수행하였다. 홍수취약성 분석은 IPCC에서 정의하는 취약성 모형을 활용하기 위하여 기후노출, 민감도, 적응도에 대한 세부지표들을 선정하였으며, 지표들을 객관적으로 분석하기 위하여 엔트로피 방법과 유클리드 방법을 활용하였다[13]. UN-DRR(UN Office for Disaster Risk Reduction)에서는 홍수피해를 유발할 수 있는 위험(Hazard), 홍수피해에 노출된 자산(Exposure), 노출된 자산의 취약성(Vulnerability), 피해를 저감시킬 수 있는 요소(Capacity)를 고려하여 홍수위험에 대한 평가를 수행하였다[14]. 인천광역시 시군구별 복원탄력성 강화에 대한 의사결정을 위하여 IBA(Indicator Based Approach)기반의 홍수위험도 평가를 수행하였다. Hazard, Exposure, Vulnerability, Capacity 4개의 항목과 11개의 세부지표를 구성하였으며 세부지표별 지수의 편향을 방지하기 위하여 분위수를 활용하여 홍수 위험도 지수를 산정하였다[15]. Hazard, Exposure, Vulnerability의 평가요소를 사용하여 토론토 Don river 유역의 홍수 위험도 평가를 수행하였으며, 추가적으로 실제 홍수가 발생할 수 있는 지역만을 고려하기 위하여 하천 인근에 사회 인프라 및 인구가 거주하고 있지 않다면 위험도를 0으로 판단하였다[16].

반면에 다차원 홍수피해 산정방법(MD-FDA; Multi Dimensional Flood Damage Analysis)을 활용하여 정량적인 홍수 피해액을 추정하여 재해예방사업 우선순위를 결정하는 연구들도 수행되고 있다[17]-[19]. 빈도별 홍수위 자료와 GIS를 활용하여 하천 계획빈도에 따른 침수 구역도를 제시하였으며, 치수사업의 예비타당성평가의 편익을 추정하기 위하여 다차원 홍수피해 산정방법을 활용하였다[20]. 기후변화에 따른 홍수범람 모의를 수행하였으며, 구조물적 홍수저감 대안에 따른 홍수피해경감액을 다차원 홍수피해 산정방법을 활용하여 산정하였다[21]. FLDWAV(Flood Wave routing)모형을 이용하여 빈도별 홍수위를 산정하고 빈도별 침수 예상지도에 따른 홍수 피해액을 다차원 홍수피해 산정방법을 이용하여 산정하였다[22].

앞선 선행연구들은 전국 단위 및 자치구 단위에서 홍수 위험 지역 선정 및 비교를 위한 홍수 위험도 평가를 수행되었다. 전국 단위 및 자치구 단위의 홍수 위험도 평가의 경우 시별 및 구별 홍수 위험도를 비교할 수 있기 때문에 국가차원에서 홍수 관리를 위한 대책을 수립하기에 용이할 수 있다. 하지만 자치구 내에서 홍수에 대한 위험지역을 선정하는 것에는 한계가 존재하기 때문에 자치구에서는 과거 침수가 일어났었던

지역을 홍수 위험지역으로 선정하여 관리하고 있다. 하지만 과거 침수흔적도 기반의 홍수 위험지역 선정은 위험지역 중에서 어느 지역이 홍수위험도가 높은지 파악할 수 없어 방재 예산을 투입하기 위한 우선순위를 결정할 수 없다는 한계가 존재한다. 강우 유출 모형 기반과 연계한 다차원 홍수피해 산정방법의 경우 정량적인 홍수 피해액이 산정되기 때문에 작은 유역 안에서도 홍수 피해액에 따른 투자 우선순위를 결정할 수 있다. 하지만 산정되는 홍수 피해액은 건물, 농경지, 공공시설물과 같은 일반자산만을 고려하여 피해금액을 산정하기 때문에 인간과 관련된 취약계층, 노후건물과 같은 사회인문학적 요인이 반영되지 않으며 산정절차가 매우 까다로워 전문적인 지식이 필요하고 많은 시간이 소요된다.

본 연구는 침수피해가 빈번하게 발생하고 있는 부산광역시 연제구에서 관리하고 있는 자연재해 유발지역의 투자우선순위 결정을 위한 격자단위 홍수 위험도 평가를 수행하였다. 지표 기반의 홍수 위험도 평가의 경우 해당 지역의 인구 분포 및 건물 분포가 밀집되어 있다면 침수피해의 발생 가능성이 존재하지 않더라도 홍수 위험도가 높게 산정되는 문제가 존재하였다. 따라서 수문학적 기반의 강우-유출 모형을 통해 생성되는 하천 범람 홍수지도와 도시침수 지도를 활용하여 실제 홍수 피해가 발생할 수 있는 지역, 즉 홍수 피해 위험도가 높은 지역을 우선적으로 선별하였다. 선별된 지역 내에서 위험도가 높은 자연재해 유발지구를 선정하기 위하여 100m×100m 격자 단위의 홍수위험도 평가를 수행하였다. 홍수위험도 평가는 홍수 피해를 유발할 수 있는 위험요소를 나타내는 Hazard 항목, 홍수피해에 노출되어 있는 정도를 나타내는 Exposure 항목, 홍수 피해에 대한 취약성을 나타내는 Vulnerability 항목으로 총 3개의 항목을 구성하고 7개 세부지표를 선정하여 격자 단위 홍수 위험도 평가를 수행하였으며 최종적으로 자연재해 유발지역의 투자우선순위를 결정하였다.

II. 방법론

2-1 표준화 방법

홍수 위험도 분석을 위한 세부지표들은 단위와 스케일이 다르기 때문에 직접적인 비교가 불가능하다. 따라서 해당 세부지표들을 비교하기 위해서는 동일한 단위와 스케일로 변환하는 과정이 필요하며 이를 위해 표준화 방법이 사용된다. 종합 지표 구성에 관한 OECD 보고서에는 지표의 표준화를 위한 방법들이 제시되어 있으며, 대표적으로 Z-score 방법과 Re-scaling 방법이 있다[23]. Z-score 방법은 원점수가 평균에서 얼마나 떨어져 있는지 나타내는 방법으로써 모든 세부지표들의 평균은 0, 표준편차는 1이 되도록 만들어 주는 방법이다. 하지만 Z-score 방법의 경우 평균보다 낮을 경우 음

수가 발생하기 때문에 별도의 후처리 과정이 필요하다는 단점이 존재한다. Re-scaling 방법은 세부지표의 최댓값과 최솟값을 이용하여 0과 1사이의 값으로 변환해주는 방법으로 본래의 데이터 정보를 변형시키지 않으며 직관적으로 데이터의 차이를 확인할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 Re-scaling 방법을 적용하였으며 아래의 식에서 I는 표준화된 지표, x_i 는 i번째 세부지표 자료를 의미하며 $\max(x)$ 는 해당 세부지표의 최댓값, $\min(x)$ 는 해당 세부지표의 최솟값을 의미한다.

$$I = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (1)$$

2-2 가중치 산정 방법

각각의 표준화된 세부지표들은 연구 목적에 따라 영향을 미치는 중요도가 다르기 때문에 적절한 가중치를 부여하는 것은 중요한 문제이다. 가중치를 부여하는 대표적인 방법에는 계층화분석 방법, 엔트로피 방법이 존재한다. 계층화분석 방법이란 상호 연관이 있는 요소들을 계층화하고 쌍대비교방법을 이용해 상대적인 영향력을 평가하는 방법이다. 계층화분석 방법의 경우 쌍대비교방법에 참여하는 전문가 집단들에 의하여 세부지표들의 가중치가 선정된다. 하지만 전문가들의 전문적 지식과 능력이 상이하기 때문에 합리적인 결과를 도출하기 어려우며 전문가들의 주관적인 의견이 반영된다. 엔트로피 방법은 지표들의 속성 정보를 기반으로 가중치를 산정하는 방법이다[24]. 엔트로피는 지표 값의 응집력이 클수록 엔트로피 값은 커지게 되며 반대로 응집력이 작을수록 엔트로피 값은 작아지게 된다. 엔트로피 방법의 경우 수학적 방법에 의거하여 가중치를 산정하기 때문에 계층화 분석 방법보다 객관적으로 가중치 부여를 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 엔트로피 가중치 방법을 선정하여 각 세부지표별 가중치를 산정하였으며, 엔트로피 산정식은 아래와 같다. 여기서 E_j 는 엔트로피 값, p 는 정규화 지표, d_j 는 속성 값의 다양성, w_j 는 지표별 가중치, k 는 상수를 의미한다.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \log p_{ij} \left(k = \frac{1}{\log m}; j = 1, 2, \dots, n \right) \quad (2)$$

$$d_i = 1 - E_i \quad (3)$$

$$w_j = \frac{d_i}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

2-3 유클리드 거리 방법

유클리드 거리 방법은 다차원의 공간에서 점과 점사이의 거리를 산정하는 방법으로써 다수의 평가지표가 존재할 때

종합적인 평가를 수행하기 위하여 사용되는 거리척도 방법 (Distance Metric) 중 하나이다. 본 연구에서는 Hazard, Exposure, Vulnerability 지수에 유클리드 거리 방법을 적용하기 때문에 3차원의 공간 안에서 산정된다. 각각의 지수들은 최소 0에서 최대1의 값을 가지기 때문에 식(5)와 같이 유클리드 거리 방법을 적용하게 되면 0~1.73 사이의 값을 가지는 홍수 위험도 지수를 산정할 수 있다. 0에 가까울수록 홍수 위험도가 낮음을 의미하며 반대로 1.73에 가까울수록 홍수 위험도가 높음을 의미한다. 유클리드 거리 산정 방법은 아래와 같으며 D는 홍수 위험지수를 의미한다.

$$D = \sqrt{(Hazard)^2 + (Exposure)^2 + (Vulnerability)^2} \quad (5)$$

III. 부산광역시 연제구 홍수위험도 평가

3-1 홍수위험도 평가를 위한 홍수 위험지역 선별

부산광역시 연제구의 실제 홍수 피해가 발생할 수 있는 지역을 선별하기 위하여 환경부 홍수위험지도 정보시스템(<https://floodmap.go.kr>)에서 제공하는 홍수 위험지도를 활용하였다. 홍수 위험지도 정보시스템에서는 강우 시나리오 및 수문학적 범람해석을 통하여 설계빈도를 초과하는 홍수가 발생하였을 경우 발생할 수 있는 홍수 위험지도를 제공하고 있다. 본 연구에서는 100년 빈도의 강수량이 발생하였을 경우 하천 범람에 의해 발생할 수 있는 하천범람지도와 30년 빈도의 강수량이 발생하였을 경우 우수배제시설의 용량 초과로 인하여 발생할 수 있는 도시 침수지도를 활용하여 실제 침수가 발생할 수 있는 지역을 선별하여 그림 1에 나타내었다. 빨간색으로 표기된 영역은 도심지역에 존재하고 있는 하천이 범람하여 발생할 수 있는 홍수위험 지역을 나타내었으며 파란색으로 표기된 영역은 우수배제시설의 용량 초과로 도시지역에서 발생할 수 있는 홍수위험 지역을 나타내었다. 부산광역시 연제구에서는 실제 침수 피해가 빈번하게 발생하고 있는 지역 7곳 (좌수영로, 토곡 사거리, 남문교차로, 교대교차로, 동래세무서 인근, 포스코더샵시티 인근, 연상5동 행정복지센터 인근)을 자연재해 우려지역으로 선정하여 관리하고 있으며 7곳 지역 모두 홍수위험 지도 내에 위치하고 있는 것을 확인할 수 있다. 침수 피해의 경우 해당 지점에서만 발생하는 것이 아닌 주변으로 침수피해가 전이되는 특성이 고려되어야 한다. 따라서 자연재해 우려지역에서 실제 침수 피해가 발생할 수 있는 적절한 범위를 고려하기 위하여 생활안전지도(<https://www.safemap.go.kr>)에서 제공하고 있는 과거 침수 피해 사례들을 참고하여 자연재해 우려지역의 주변 30,000m²까지 침수 피해가 발생할 수 있는 범위로 설정하였다.

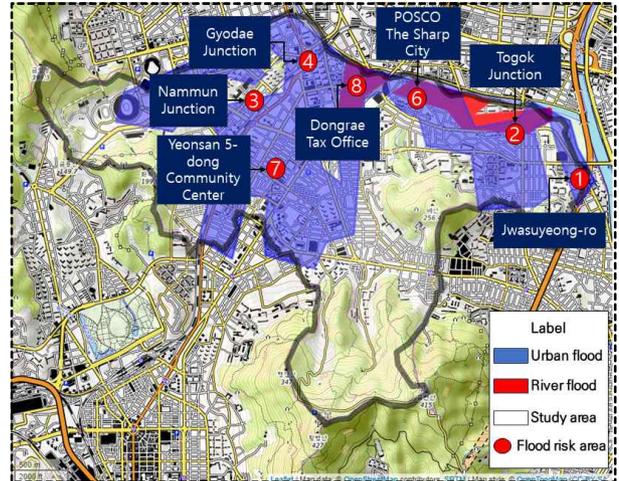


그림 1. 부산광역시 연제구 자연재해 우려지역
Fig. 1. Flood risk map of Yeonje-gu, Busan

표 1. 자연재해 우려지역 정보

Table 1. Flood risk area information

Point	Flood risk area	Latitude	Longitude
1	Jwasuyeong-ro	35.1829	129.1140
2	Togok junction	35.1878	129.1061
3	Nammun junction	35.1872	129.0728
4	Gyodae junction	35.1959	129.0807
5	Dongrae tax office	35.1925	129.0868
6	Posco the sharp city	35.1910	129.0944
7	Yeonsan 5-dong community center	35.1844	129.0760

3-2 홍수위험도 평가를 위한 Hazard 세부지표별 지수 산정

자연재해 우려지역의 투자우선순위 결정을 위한 홍수위험도 평가의 Hazard 항목은 선행연구에서 많이 활용된 100년 빈도의 확률 강우량과 가장 최근에 피해가 발생했던 2020년을 기준으로 하는 지속시간 24시간 최대강우량을 세부지표로 선정하였다. 세부지표 데이터 구축을 위하여 기상청 방재기상 관측 자료 중 총 5개 관측소(동래, 부산남구, 부산진, 북구, 해운대)를 활용하였으며 각각의 100년 빈도 확률강우량과 지속시간 24시간 최대강우량을 산정하였다. 해당 자료는 지점 강우량 자료이기 때문에 크리깅 보간 방법을 사용하여 100m×100m 격자단위 확률강우량과 지속시간 24시간 최대강우량을 산정하였다. 사용한 방재기상관측소 지점 정보와 산정된 확률강우량 및 최대 강우량은 표 2에 나타났다. 해안과 가까운 위치에 존재하는 부산남구 관측소와 해운대 관측소는 높은 확률강우량과 최대강우량이 나타나고 있으며 비교적 내륙 지역에 위치한 동래 관측소와 북구 관측소는 낮은 강우량을 보이고 있다. 자연재해 우려지역의 침수범위와 격자단위 확률강우량과 최대강우량을 중첩하기 위하여 격자단위 자료를 포

인트 자료로 변환하여 침수범위에 포함되는 포인트 자료를 홍수위험도 평가 자료로 추출하였다. 이후 자연재해 우려지역별 격자단위 확률강우량과 최대강우량은 Re-scaling 방법을 통하여 0~1사이의 값으로 변환하였으며 엔트로피 방법을 이용하여 세부지표별 가중치를 산정한 결과 100년 빈도 확률강우량의 가중치는 0.5611, 최대강우량은 0.4389로 산정되었다. 세부지표별 가중치를 적용한 자연재해 우려지역별 격자평균 Hazard 지수는 표 3에 나타났다.

표 2. 기상관측소 정보 및 Hazard 항목의 세부지표
Table 2. Weather station information and detailed indicators for hazard

Station	Latitude	Longitude	Frequency based rainfall (mm)	Maximum rainfall (mm)
Dongnae	35.2091	129.0901	304.8	192.6
Busannam-gu	35.1186	129.0884	393.9	255.8
Busanjin	35.1588	129.0192	369.7	230.2
Buk-gu	35.2130	129.0025	300.5	151.4
Haeundae	35.1761	129.1623	364.4	212.6

표 3. 자연재해 우려지역별 격자 평균 세부지표 Re-scaling 결과 및 Hazard 지수

Table 3. Grid average detailed indicators re-scaling result and hazard index by flood risk area

Point	Frequency based rainfall(mm)		Maximum rainfall(mm)		Hazard index
	Raw data	Re scaling data	Raw data	Re scaling data	
1	338.916	0.926	212.998	0.945	0.9340
2	328.177	0.548	209.599	0.713	0.6202
3	325.822	0.465	204.425	0.361	0.4191
4	314.359	0.061	200.170	0.072	0.0655
5	316.658	0.142	203.822	0.320	0.2201
6	318.797	0.217	205.961	0.466	0.3263
7	331.272	0.656	208.277	0.623	0.6419

3-3 홍수위험도 평가를 위한 Exposure 및 Vulnerability 세부지표별 지수 산정

Exposure 항목의 경우 홍수피해에 노출되어 있는 정도를 나타낼 수 있는 지표들을 선정해야 한다. 선행연구들에서는 토지 피복 정보, 장애인 비율, 인구밀도, 건축물 수 등을 세부지표로 고려하였다. 본 연구에서는 자치구 내에 위치한 자연재해 우려지역의 투자우선 순위 결정을 위한 것이므로 격자단위 데이터를 수집할 수 있어야하기 때문에 국토정보플랫폼(<https://map.ngii.go.kr>)에서 제공하고 있는 격자단위 건축

물 수, 인구수를 세부지표로 고려하였다. 추가적으로 도시 지역의 침수피해는 대부분 도로에서 발생하고 있으며, 연제구의 자연재해 우려지역 모두 도심지 도로에서의 피해이다. 따라서 해당하는 격자의 도로면적 비율을 추가적으로 세부지표로 고려하였다. 도로면적의 경우 도로명 전자지도를 활용하였으며 그림 2와 같이 제공하고 있다. 해당 자료에서는 실측 도로 길이와 폭을 제공하고 있기 때문에 도로 길이와 폭을 면적으로 환산하고 해당 격자에 해당하는 도로의 면적 비율을 산정하였다.

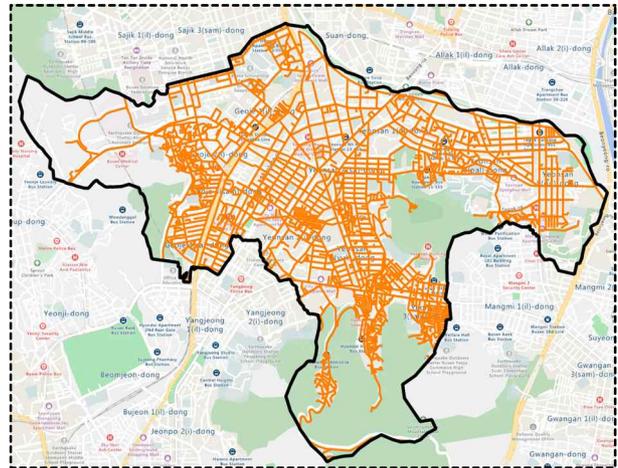


그림 2. 부산광역시 연제구의 도로 현황
Fig. 2. Road status in Yeonje-gu, Busan

표 4. 자연재해 우려지역별 격자 평균 Exposure 세부지표 Re-scaling 결과

Table 4. Grid average Exposure detailed indicators re-scaling results by flood risk areas

Point	Number of population		Number of building		Road area	
	Raw data	Re scaling data	Raw data	Re scaling data	Raw data	Re scaling data
1	3376	0.1757	40	0.0574	39.82	0.4550
2	2534	0.1319	320	0.4597	34.97	0.3996
3	1448	0.0695	173	0.2294	46.67	0.4923
4	3945	0.2053	119	0.1709	34.10	0.3897
5	2948	0.1416	202	0.2679	20.26	0.2138
6	3788	0.2150	206	0.3228	16.81	0.2096
7	4563	0.2375	475	0.6824	26.18	0.2991

연산5동 행정복지센터 인근지역의 경우 인구수와 총 건물 수가 가장 많이 분포하고 있는 것으로 나타났으며, 좌수영로의 경우 현재 아파트 단지가 건설되고 있는 지역이기 때문에 건물의 개수가 다른 지역들에 비하여 상대적으로 적게 나타나고 있다. 남문교차로의 경우 상업용 건물들이 많이 분포

하고 있는 지역이기 때문에 인구수가 가장 적게 분포하고 도로의 면적이 가장 많이 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다. 반대로 포스코더샵시티 인근의 경우에는 거주용 건물이 다수 분포하고 있어 인구수, 건물수의 비율이 높지만 도로 면적이 적게 나타나는 것을 파악할 수 있다. 해당 세부지표들도 마찬가지로 100m×100m 격자자료이기 때문에 포인트 자료로 변환하여 자연재해 우려지역 침수범위 내의 포함되는 자료들만 추출하였으며, 각 격자별 데이터는 Re-scaling 방법을 적용하여 표 4에 표기하였다.

엔트로피 가중치 산정결과 인구수의 가중치는 0.4940, 건물 수는 0.2957, 도로면적의 비율을 0.2103으로 산정되었다. 해당 가중치는 각각의 격자에 적용하여 격자별 Exposure 지수를 산정하였으며, 자연재해 우려지역별 격자 평균 Exposure 지수는 표 5에 제시하였다.

표 5. 자연재해 우려지역별 평균 Exposure 지수
Table 5. Average exposure index by flood risk areas

Point	Exposure index
1	0.1898
2	0.2779
3	0.2019
4	0.2226
5	0.1863
6	0.2339
7	0.3689

표 6. 자연재해 우려지역별 격자 평균 세부지표 Re-scaling 결과 및 vulnerability 지수

Table 6. Grid average detailed indicators re-scaling result and vulnerability index by flood risk area

Point	Number of population		Number of old building		Vulnerability index
	Raw data	Re scaling data	Raw data	Re scaling data	
1	6	0.0152	12	0.0213	0.0095
2	515	0.1089	264	0.4681	0.2570
3	185	0.0361	106	0.1735	0.0928
4	705	0.1491	61	0.1082	0.1322
5	693	0.1353	133	0.2177	0.1693
6	525	0.1211	153	0.2959	0.1933
7	850	0.1797	363	0.6436	0.3711

Vulnerability 항목은 Exposure 항목에 대한 취약성을 나타내는 항목이다. 따라서 격자별 인구수, 건물 수에 대한 취약성을 평가하기 위하여 취약인구와 노후건물을 세부지표로 구성하였다. 노후 건물의 경우 20년 이상이 경과한 건물을 노후 건물로 정의하였으며, 취약인구의 경우 0세~7세와 65세 이

상의 인구를 취약인구로 정의하여 2020년의 격자단위 데이터를 수집하였다. 좌수영로의 경우 노후 건물의 개수가 다른 위험지역과 비교하였을 때 현저하게 낮은 것을 확인할 수 있다. 해당 지역의 경우 대형 아파트 단지의 건설이 진행되고 있어 노후건물의 개수가 적은 것으로 판단된다. 연산5동 행정복지센터의 경우 거주인구와 건물이 많아 취약인구 및 노후 건축물도 가장 많이 분포하고 있는 것으로 나타났다.

엔트로피 가중치 적용 결과 취약인구에 대한 가중치는 0.5876, 노후 건축물은 0.4124로 산정되었으며, 자연재해 우려지역별 총 취약인구수, 총 노후 건축물수는 표 6 Raw data에 나타냈으며, 격자 평균 정규화 결과는 Re-scaling data에 제시하였다. 최종적으로 자연재해 우려지역별 자연재해 우려지역 평균 Vulnerability 지수는 표 6에 나타냈다.

3-4 부산광역시 연제구 격자단위 홍수위험도 지수 산정

부산광역시 연제구의 자연재해 우려지역에 해당하는 격자들의 Hazard, Exposure, Vulnerability 지수를 산정하였으며 홍수위험도 지수를 산정하기 위하여 유클리드 거리 산정 방법을 적용하였다. 유클리드 거리를 적용하게 되면 0에서 1.73사이의 값의 범위를 가지며 원점인 0에 가까울수록 홍수 위험도가 낮음을 의미한다. 최종적으로 각 격자별 홍수위험도 지수를 산정한 결과는 그림 3에 나타났다. 홍수위험 지수는 최소 0.11부터 최대 1.01까지 분포하고 있으며 자연재해 유발지역과 인접한 격자들은 비슷한 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 교대교차로와 포스코더샵시티의 경우 다른 주변 격자들보다 일부 격자 1~2개가 높은 위험도 지수를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 격자자료가 가지는 특성이 다른 지역과 다르기에 나타나는 현상으로 해당격자들은 아파트 단지가 형성되어 있는 격자이기 때문에 높은 인구밀도와 취약계층이 다수 존재하여 위험도가 높게 산정되었다.

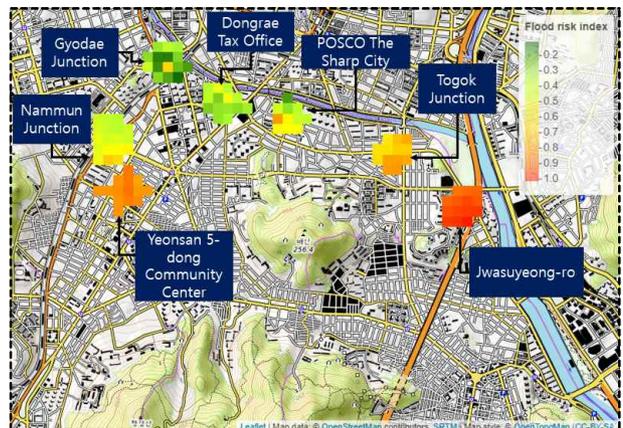


그림 3. 격자별 홍수위험도 평가 결과
Fig. 3. Flood risk assessment results for each grid

표 7. 자연재해 유발지역별 홍수위험도 평가 결과

Table 7. Flood risk assessment results

Flood risk area	Flood risk index	Flood risk ranking
Jwasuyeong-ro	0.9550	1
Togok junction	0.7339	3
Nammun junction	0.4860	4
Gyodae junction	0.2921	7
Dongrae tax office	0.3564	6
POSCO the sharp city	0.4798	5
Yeosan 5-dong community center	0.8373	2

자연재해 우려지역별 평균 홍수위험지수는 표 7에 나타났다. 좌수영로가 0.9550으로 가장 홍수로부터 위험한 지역으로 선정되었으며 교대교차로가 0.2921로 가장 안전한 지역으로 선정되었다. 좌수영로와 토곡사거리의 경우 지속시간 24시간 최대 강우량과 100년 빈도 확률강우량의 값이 타 우려지역보다 높아 홍수가 발생할 경우 더 큰 피해를 유발할 수 있기 때문에 홍수 위험지수가 높게 선정되었다. 교대교차로의 경우 인구가 적게 거주하는 상업지역이기 때문에 인구수와 취약계층의 수가 적게 분포하고 있으며 상대적으로 타 우려지역보다 강수량이 낮아 홍수 위험도 지수가 낮게 선정되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 부산광역시 연제구의 자연재해 유발지역 투자우선순위 결정을 위하여 격자단위의 홍수위험도를 평가하는 방안을 제시하였다. 연제구의 경우 도시하천으로 인한 피해가 발생할 수 있는 지역이기 때문에 하천홍수범람지도 및 내수침수범람지도를 활용하여 실제로 피해가 발생할 수 있는 지역만을 추출하였다. 홍수위험도 평가는 Hazard, Exposure, Vulnerability 항목과 7개의 세부지표를 격자단위로 수집 및 가공하였으며 데이터들의 범위를 통일시키기 위하여 정규화하였다. 이후 세부지표별 가중치를 산정하기 위하여 엔트로피 방법을 적용하였으며 최종적으로 유클리드 방법을 적용하여 자연재해 유발지역별 홍수위험도 지수를 산정하였으며 본 연구의 시사점을 아래와 같이 얻을 수 있었다.

첫째, 홍수 위험지도 활용의 유용함이다. 본 연구에서는 홍수 위험지도를 활용하여 지표기반의 홍수 위험도 평가를 수행하여 자연재해 유발지역 중 좌수영로, 연산5동 행정복지센터, 토곡 사거리 순으로 방재예산을 투자해야 함을 제시하였다. 해당 지역들의 특징으로는 강수로 인한 위험요소가 존재하며, 피해에 노출된 인구, 건물, 취약계층 등이 다수 존재한다는 것이다. 이는 선행 연구들에서도 제시된 것과 같이 지표기반 홍수 위험도 평가의 경우 지표 값이 클수록 홍수로부터 위험한 지역임을 의미하게 된다. 홍수 위험지도를 활용하지

않고 단순히 지표기반의 홍수 위험도 평가를 수행하게 되면 홍수가 발생할 가능성이 존재하지 않음에도 홍수 위험 지수가 크게 선정될 문제가 존재한다는 것이다. 이러한 결과는 잘못된 방재예산 투입으로 이어질 수 있다. 따라서 본 연구와 같이 홍수 위험지도를 활용하여 피해 가능성이 있는 지역만을 선별한 다음 홍수 위험도 평가를 수행하는 것이 합리적인 의사결정을 내릴 수 있는 자료로서 활용이 될 것이다.

둘째, 격자단위 자료를 활용한다면 부산광역시 연제구와 같이 조밀한 지역에서의 홍수 위험도 평가를 수행할 수 있다. 기존의 홍수위험도 평가는 시군구 단위의 통계자료를 활용하여 위험 시군구를 결정하는 연구들이 수행되었으나 자연재해 저감 종합계획과 같이 지구단위의 투자 우선순위를 결정하는데 한계가 존재한다. 격자단위의 통계자료와 홍수 위험지도를 활용한다면 사회 인문학적 특성과 수문학적 특성을 동시에 고려하여 지구단위의 복합적 위험도 평가를 수행할 수 있다.

하지만 본 연구에서는 격자단위의 자료들을 활용하기 위하여 7개의 세부지표만 선정하였지만 향후 추가적인 세부지표를 고려한다면 더욱 정밀한 위험도 평가를 수행할 수 있을 것이라 판단되며, 향후 정량적 위험도평가인 다차원 법과 결과를 비교해 보는 것도 필요하다고 판단된다. 기존의 자치구에서는 한정적인 예산으로 재해예방 사업의 투자 우선순위를 결정하기 때문에 의사결정자는 의사결정에 어려움이 따르지만 본 연구에서 제시하는 격자단위 홍수위험도 평가를 수행하게 된다면 자치구 내에 존재하는 홍수 위험지역에 대한 투자 계획을 효과적으로 수립할 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 자연재난 정책연계형 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2022-MOIS35-005)

참고문헌

[1] UNISDR (The United Nations Office for Disaster Risk Reduction), *The Human Cost of Weather-Related Disasters 1995-2015*, Author, Geneva, Switzerland, 2015.

[2] O. Zabihi, M. Siamaki, M. Gheibi, M. Akrami, and M. Hajiaghaci-Keshstel, "A Smart Sustainable System for Flood Damage Management with the Application of Artificial Intelligence and Multi-Criteria Decision-Making Computations," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 84, 103470, January 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103470>

[3] W. H. Kuang, L. J. Chen, J. Y. Liu, W. N. Xiang, W. F. Chi, D. S. Lu, ... and A. L. Liu, "Remote Sensing-Based Artificial Surface Cover Classification in Asia and Spatial

- Pattern Analysis,” *Science China Earth Sciences*, Vol. 59, No. 9, pp. 1720-1737, September 2016. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-5295-7>
- [4] Y. Bayazit, C. Koç, and R. Bakış, “Urbanization Impacts on Flash Urban Floods in Bodrum Province, Turkey,” *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 66, No. 1, pp. 118-133, 2021. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1851031>
- [5] A. L. Hammond and World Resources Institute, *Environmental Indicators: A Systematic Approach to Measuring and Reporting on Environmental Policy Performance in the Context of Sustainable Development*, Washington, DC: World Resources Institute, 1995.
- [6] N. Hwang, H. Park, and G. Chung, “Flood Vulnerability Analysis in Seoul, Korea,” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 10, pp. 729-742, October 2019. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2019.52.10.729>
- [7] S. Lee, Y. Choi, J. Ji, E. Lee, S. Yi, and J. Yi, “Flood Vulnerability Assessment of an Urban Area: A Case Study in Seoul, South Korea,” *Water*, Vol. 15, No. 11, 1979, May 2023. <https://doi.org/10.3390/w15111979>
- [8] J. Zheng and G. Huang, “Towards Flood Risk Reduction: Commonalities and Differences between Urban Flood Resilience and Risk Based on a Case Study in the Pearl River Delta,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 86, 103568, February 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103568>
- [9] K. S. Lim, S. J. Choi, D. R. Lee, and J. W. Moon, “Development of Flood Risk Index Using Causal Relationships of Flood Indicators,” *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 30, No. 1B, pp. 61-70, February 2010. <https://doi.org/10.12652/Ksce.2010.30.1B.061>
- [10] J. H. Song, S. Kim, M. J. Park, and H. I. Choi, “Estimation of Flood Risk Index for the Nakdong River Watershed,” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 1, pp. 35-45, January 2013. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2013.46.1.35>
- [11] J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken, and K. S. White, *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change), Geneva, Switzerland, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001.
- [12] J. Kim, H. H. Sung, and G. Choi, “Spatial Patterns of Urban Flood Vulnerability in Seoul,” *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, Vol. 19, No. 4, pp. 615-626, November 2013.
- [13] S. Lee, Y. Choi, and J. Yi, “Urban Flood Vulnerability Assessment Using the Entropy Weight Method,” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, No. 6, pp. 389-397, December 2020. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2020.20.6.389>
- [14] UNISDR(United Nations International Strategy for Disaster Reduction), *UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*, United Nations, Geneva, Switzerland, UNISDR-20-2009-Geneva, 2009.
- [15] W. Wang, D. Kim, Y. Yoo, J. Lee, K. T. Kim, and H. S. Kim, “Support for Decision-Making on the Resilience of Incheon Metropolitan City Using Flood Risk Assessment,” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 21, No. 4, pp. 197-210, August 2021. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2021.21.4.197>
- [16] C. Armenakis, E. X. Du, S. Natesan, R. A. Persad, and Y. Zhang, “Flood Risk Assessment in Urban Areas Based on Spatial Analytics and Social Factors,” *Geosciences*, Vol. 7, No. 4, 123, November 2017. <https://doi.org/10.3390/geosciences7040123>
- [17] Y. H. Tak, Y. D. Kim, B. Kang, and M. H. Park, “Application of Multi-Dimensional Flood Damage Analysis in Urban Area,” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 6, pp. 397-405, June 2017. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2017.50.6.397>
- [18] K. H. Lee, S. A. Choi, H. S. Kim, and M. P. Shim, “Application of Multi-Dimensional Flood Damage Analysis for Urban Flood Damage,” *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 26, No. 4B, pp. 363-369, July 2006. <https://doi.org/10.12652/Ksce.2006.26.4B.363>
- [19] D. H. Kang, S. H. Lee, G. H. Kim, and B. S. Kim, “Estimation of Flood Damage Using Building Group Inventory and Multi-Dimensional Flood Damage Analysis,” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 7, pp. 119-127, December 2018. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.7.119>
- [20] C. S. Yi, S. A. Choi, M. P. Shim, and H. S. Kim, “GIS Based Distributed Flood Damage Assessment,” *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 26, No. 3B, pp. 301-310, May 2006. <https://doi.org/10.12652/Ksce.2006.26.3B.301>
- [21] D. Han, C. Choi, D. Kim, J. Jung, J. Kim, and S. J. Kim, “Determination of Flood Reduction Alternatives for Responding to Climate Change in Gyeongang Watershed,” *Journal of Wetlands Research*, Vol. 18, No. 2, pp. 154-165, May 2016. <https://doi.org/10.17663/JWR.2016.1>

8.2.154

- [22] G. S. Lee and J. H. Park, "Flood Damage Assessment according to the Scenarios Coupled with GIS Data," *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 19, No. 4, pp. 71-80, December 2011.
- [23] M. Nardo, M. Saisana, A. Saltelli, S. Tarantola, A. Hoffman, and E. Giovannini, *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*, OECD(Organisation for Economic Cooperation and Development), Paris, France, STD/DOC(2005)3, August 2005.
- [24] C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," *The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, No. 3, pp. 379-423, July 1948. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>



이하늘 (Haneul Lee)

2020년 : 인하대학교 사회인프라공학과 (공학학사)
 2022년 : 인하대학교 스마트시티공학과 (공학석사)

2022년~현 재: 인하대학교 스마트시티공학과 박사과정
 ※ 관심분야 : 딥러닝, 빅데이터, 홍수



김동현 (Donghyun Kim)

2019년 : 인하대학교 토목공학과 (공학석사)
 2022년 : 인하대학교 스마트시티공학과 (공학박사)

2022년~현 재: 수자원시스템 연구소 연구원
 ※ 관심분야 : 인공지능(AI), 재난안전, 홍수



백선욱 (Seonuk Baek)

2020년 : 인하공업전문대학 토목환경과 (전문학사)
 2021년 : 국가평생교육진흥원 토목공학과 (공학사)
 2023년 : 인하대학교 스마트시티공학과 (공학석사)

2023년~현 재: 인하대학교 스마트시티공학과 박사과정
 ※ 관심분야 : 수문학, 침수해석



이준학 (Joonhak Lee)

2020년 : 인하공업전문대학 토목환경과 (전문학사)
 2021년 : 국가평생교육진흥원 토목공학과 (공학사)

2021년~현 재: 인하대학교 스마트시티공학과 석사과정
 ※ 관심분야 : 인공지능(AI), 홍수 피해 예측



김수전 (Soojun Kim)

2003년 : 인하대학교 토목공학과 (공학학사)
 2005년 : 인하대학교 토목공학과 (공학석사)
 2011년 : 인하대학교 토목공학과 (공학박사)

2022년~2016년: Columbia University, Columbia Water Center, Associate Research Scientist
 2017년~현 재: 인하대학교 사회인프라공학과 부교수
 ※ 관심분야 : 가뭄, 빅데이터, 인공지능, 재난안전, 홍수