엔트로피 가중치 산정방법을 활용한 도시지역 홍수취약성 평가

Urban Flood Vulnerability Assessment Using the Entropy Weight Method

이선미* · 최영제** · 이재응***

Lee, Seonmi*, Choi, Youngje**, and Yi, Jaeeung***

Abstract

Locally concentrated heavy rainfall has led to an increase in the occurrence of flood damage. This is especially so in the urban areas, which are relatively more vulnerable to flood damage due to the high population and property density. In Seoul, which has 25 administrative districts, heavy rainfall triggered flood-related damage in 2010, 2011, and 2018. However, the flood characteristics of each district were different due to difference in flood impact factors such as topography, weather, and disaster prevention measures. The flood vulnerability of each district should be assessed based on local characteristics to reduce flood damage. This study collected and calculated 15 characteristic data points that can explain the climate exposure, sensitivity, and adaptive capacity of each district using the entropy weight method. Thereafter, the flood vulnerability of each district was calculated based on climate exposure, sensitivity, and adaptive capacity, using the Euclidean method. The results showed that the northern and western areas in Seoul are highly vulnerable due to high climate exposure, sensitivity, and low adaptive capacity. In contrast, the other parts of Seoul had low vulnerability due to high sensitivity, low climate exposure, and high adaptive capacity. These results will contribute to the establishment of a flood damage reduction plan that reflects local characteristics.

Key words : Urban Flood, Flood Vulnerability, Entropy Method, Euclidean Method

요 지

최근 국내에서는 집중호우가 빈번하게 발생하고 있고, 이로 인한 홍수피해 발생횟수와 규모가 증가하고 있다. 2010년, 2011년, 2018년 서울에서는 집중호우로 인한 홍수로 인해 인명과 재산에 큰 피해가 발생하였다. 서울은 25개의 자치구가 밀집되어 있지만 자치구별로 지형, 기후, 방재특성 등 홍수피해에 영향을 미치는 요소들이 상이함에 따라 피해특성 또한 차이가 있다. 이에 따라 지역특성을 고려하여 홍수취약성을 분석하고, 지역별 적절한 홍수저감 조치가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 서울특별시 25개 자치구의 홍수취약성을 분석하기 위해 평가지표인 기후노출, 민감도, 적응도에 대한 총 15개의 세부지표를 선정하였다. 선정된 지표를 객관적으로 분석 가능한 엔트로피 방법과 유클리드 방법을 활용하여 지역별 홍수취약도를 산정하였다. 그 결과 서울 북부와 서부지역의 기후노출과 민감도가 높고, 적응도가 낮아 홍수취약도가 가장 높게 산정되었으며, 서울 중부와 남부지역은 민감도는 높지만 기후노출이 적고 적응도가 높아 홍수취약도가 낮게 산정되었다. 이러한 홍수취약성 분석결과를 지역 별 특성을 반영한 홍수피해 저감 대책방안 수립을 위해 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 도시홍수, 홍수취약성, 엔트로피 방법, 유클리드 방법

*정회원, 아주대학교 건설시스템공학과 석사과정(E-mail: sunki7070@ajou.ac.kr)

Member, Master's Course, Department of Civil Engineering, Ajou University

**아주대학교 건설시스템공학과 박사과정(E-mail: dhfodhs@ajou.ac.kr)

Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Ajou University

***교신저자, 정회원, 아주대학교 건설시스템공학과 교수(Tel: +82-31-219-2507, Fax: +82-31-219-2501, E-mail: jeyi@ajou.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Ajou University

1. 서론

최근 국내에서는 집중호우가 빈번하게 발생하고 있고, 이로 인한 홍수피해 발생과 기상청의 호우특보 발령이 증가하고 있다(Seo and Lee, 2011). 시간당 80 mm 이상의 집중호우 발생 증가로 인해 건물피해나 인명피해 또한 자주 발생하고 있다. 집중호우로 인한 피해는 전국에서 발생하고 있지만 특히 최근에는 도시지역에서 자주 발생하고 있다. Han and Park (2014)에 따르면 서울 강남역 주변은 2000년 이후 총 5번이 침수되었으며, 2010년 이후에는 침수 피해가 잦게 발생하고 있다. 도시지역은 타 지역에 비해 인구와 재산이 밀집되어 있고, 배수에 불리한 지형조건으로 인해 홍수취약성이 매우 높은 지역이다. ME (2018)에 따르면 실제로 2018년 8월 서울에서는 시간당 70 mm 이상의 강우가 발생하였고, 이로 인해 중랑천이 범람하여 인명피해와 차량침수 등 재산피해가 발생하였다. 이러한 홍수피해는 대체로 하수관거 설계빈도 이상의 강우 발생으로 인해 빗물을 배제하지 못하여 발생하는 내수침수로 인한 피해이다. 2016년 7월 서울 강남구, 서초구 부근 지역에서는 시간최대강우량이 약 26 mm였으며 홍수피해가 발생하였다. 하지만 시간최대강우량이 약 30 mm였던 관악구 부근 지역에서는 강남구와 서초구 부근 지역에 비해 더 많은 강우가 발생하였지만 홍수피해는 발생하지 않았다. 이처럼 서울지역은 25개 자치구가 밀집되어 있지만 지역별로 기후노출과 방재성능, 지형특성 등이 다르기 때문에 홍수피해 특성이 다르다.

지역특성을 고려한 홍수취약성 분석과 관련하여 현재까지 다양한 선행연구들이 수행되어 왔다. 홍수취약성을 분석하기 위해 IPCC의 취약성 모델을 기반으로 Kim et al. (2013)은 최근 5년간 서울시 자치구별 기후요인, 민감도, 적응도 요소를 고려하여 홍수취약도를 산정하였으며, 지역별 홍수취약성의 공간적 분포 특징을 분석하는 연구를 진행하였고, Shin et al. (2019)은 지역별 기후 및 인구, 방재, 홍수피해액 자료를 구축하여 한강권역 도시지역을 대상으로 군집분석 및 주성분분석을 통해 홍수취약성을 평가하였다. Ouma and Tateishi (2014)는 케냐 에도레트 도시의 지방 자치구를 단위로 Analytical Hierarchy Process (AHP) 기법과 GIS 공간분석을 활용하여 홍수취약도를 지도화하였고, Song et al. (2013)은 낙동강 유역을 대상으로 OECD의 취약성 모델인 Pressure-State-Response (PSR) 체계를 적용하여 시군구별 평가지표를 선정하고, 평가지표별 동일한 가중치를 적용하여 홍수위험지수를 산정하는 연구를 진행한 바 있다.

기존 연구들은 홍수취약성을 평가하기 위해 다양한 취약성 모델을 기반으로 평가지표를 선정하였고, 이를 활용하여 홍수취약성을 평가하였다. 하지만 평가인자별 가중치 산정 시 단순평균법이나 AHP 기법 등 연구자의 주관이 필요한 방법들을 활용하게 되면 홍수취약도 산정결과의 정확도가 낮아질 가능성이 높기 때문에 객관적으로 홍수취약성을

평가할 수 있는 방안이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 서울특별시를 대상으로 지역특성을 고려하여 홍수취약성을 평가하는 방안에 대해 제시하고자 하였다. 홍수취약성을 평가하기 위해 엔트로피 가중치 산정방법(Entropy Weight Method)과 유클리드 거리 산정방법(Euclidean Distance Method)을 접목시켜 활용하였다. 대상지역은 서울특별시 25개 자치구이며, 각 지역별로 기후 및 지형, 방재 등 지역특성이 다르기 때문에 지역을 구분할 수 있는 세부지표를 선정하였다. 이 세부지표의 가중치를 산정하기 위해 다양한 통계자료를 수집한 후 엔트로피 방법을 활용하였다. 산정된 세부지표별 엔트로피 가중치를 합하여 기후노출, 민감도, 적응도 등의 지수를 산출하였으며, 산정된 결과에 유클리드 방법을 적용하여 홍수취약도를 산정하였다. 기존 연구에서는 엔트로피 방법으로 지표별 가중치를 산정한 후 단순평균법 등을 활용하여 홍수취약도를 산정하였다. 하지만 본 연구에서는 지표별 가중치에 유클리드 방법을 접목시켜 홍수취약도를 산정함으로써 객관성을 더 높일 수 있는 방안에 대해 제시하고자 하였다.

2. 대상지역 및 연구 방법

2.1 대상지역

본 연구는 서울특별시를 대상으로 수행되었다. 서울특별시 내에는 25개 자치구가 밀집되어 있지만 자치구별 기후특성 및 지형, 방재특성이 다르다. 또한 Fig. 1과 같이 25개의 자치구 중 대부분은 도시화가 진행되고 있으며, 서울의 시가화 비율은 약 61%로 매년 증가하고 있다. 이처럼 서울은 증가하는 도시화로 인해 빗물 배수에 불리한 토지특성을 갖고 있으며, 2010년 이후 내수 침수피해가 잦게 발생하고 있다.

Fig. 1. Density of Urban Areas in Seoul

2.2 홍수취약성

일반적으로 홍수취약성 분석과 관련된 연구에서는 OECD의 PSR 체계와 IPCC의 기후변화 취약성 평가 모델 등이 주로 활용된다. OECD에서 정의한 PSR 체계는 압력지수(PI), 현상지수(SI), 대책지수(RF)로 구분하여 어떤 사상의 원인, 그 사상으로 인한 직접적 또는 간접적 현상, 사상에 대한 피해 저감을 위한 활동으로 취약성을 평가하는 체계이다(OECD, 1991). IPCC에서는 기후변화 취약성을 평가하기 위해 취약성을 Fig. 2와 같이 정의하였다. 이는 기후와 관련된 요소인 기후노출, 기후노출에 대한 어떤 시스템(사회)의 민감도, 기후노출에 대한 적응능력을 의미하는 적응도의 함수로 취약성을 정의하였다(IPCC, 2001). 본 연구에서는 기후, 지형, 방재 특성 등 홍수피해와 관련된 요인들을 고려하여 홍수취약성을 파악하기 위해 IPCC에서 정의한 취약성 개념을 활용하였다.

Fig. 2. Flood Vulnerability (IPCC)

2.3 엔트로피 가중치 산정방법

다양한 지표를 활용하여 취약도를 평가하기 위해서는 엔트로피 가중치, AHP, TOPSIS 등의 방법이 활용된다. 이 중 엔트로피 방법은 섀넌(Shannon)의 정보이론을 바탕으로 지표의 속성정보를 활용하여 가중치를 산정하는 방법이다. 먼저 엔트로피란 정보 속성의 다양성으로 결정이 되며, 지표 값의 응집도가 클수록 엔트로피 가중치는 크게 산정된다. 엔트로피 가중치 산정방법은 수학적으로 가중치를 산정하기 때문에 연구자의 주관에 배제하고 객관적으로 가중치를 산정할 수 있다는 장점이 있다(Shannon, 1948a, 1948b). 이 방법은 취약성 평가를 위해 지표별 가중치를 산정하기 위한 방법으로 많이 활용된다(Ha et al., 2019). 본 연구에서도 통계지표 기반의 객관적인 홍수취약성 분석을 위해 엔트로피 방법을 활용하여 기후노출, 민감도, 적응도 등 세부지표의 가중치를 산정하였다.

엔트로피를 활용하여 가중치를 산정하기 위한 절차는 아래와 같다.

첫째. Eq. (1)과 같이 자료를 행렬(D)로 구성해야 한다. 이때 n 은 세부지표 개수, m 은 분석하고자 하는 지역 개수를

의미한다.

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

둘째. 행렬을 구성한 후 구축한 자료의 단위가 모두 다르기 때문에 자료의 정규화 과정이 필요하다. 자료를 정규화하기 위한 방법으로는 MIN-MAX 방법, Z-Score 방법 등이 있다. 본 연구에서는 지표 데이터가 0에서 1사이의 범위를 갖도록 Eq. (2)와 같은 MIN-MAX 방법을 적용하였다. 엔트로피 이론에서 p 는 발생확률을 의미하지만 본 연구에서는 지표 값들을 정규화한 값으로 대체하였다.

$$p_{i,j} = \frac{x_{i,j} - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (2)$$

셋째. 데이터를 정규화한 후, Eq. (3)과 같이 세부지표별 엔트로피 값(E_j)을 산정한다. 엔트로피 값은 지표 값의 분산이 클수록 크게 산정된다. 이때 k 는 대상지역의 개수를 고려하기 위한 상수이다.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{i,j} \ln p_{i,j} \quad (k = 1/\ln(m)) \quad (3)$$

넷째. 산정된 엔트로피 값을 활용하여 Eq. (4)와 같이 지표 속성 값의 다양성(d_j)을 산정한 후, Eq. (5)와 같이 지표별 가중치(w_j)를 산정할 수 있다.

$$d_j = 1 - E_j \quad (4)$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (5)$$

2.4 유클리드 거리 산정방법

본 연구에서는 엔트로피 방법을 활용해 산정된 자치구별 기후노출, 민감도, 적응도 등의 지표를 활용하여 홍수취약도를 산정하기 위해 유클리드 거리 산정방법을 적용하였다. 유클리드 거리 산정방법은 유클리드 공간 내에서 두 점 사이의 거리를 산정하기 위한 방법이다. 이 방법은 자료를 분석하는 방법 중 자료 속성 간의 거리를 이용하는 군집 분석 시에도 활용이 되며, 다양한 연구에서 자료를 정량화하기 위한 방법으로 활용되었다(Han and Cho, 2018).

Fig. 3과 같이 기후노출, 민감도, 1-적응도로 3차원 좌표를 구성하여 원점(0,0,0)을 홍수취약성이 가장 낮은 이상적인 안전지역이라고 가정한 후, Eq. (6)과 같이 대상지역의 점

(기후노출(*Exp*), 민감도(*Sen*), 1-적응도(*Adap*))까지의 거리(*d*)를 홍수취약도라고 정의하였다. 이러한 방식으로 자치구별 홍수취약성을 평가하는 것은 자치구의 기후노출, 민감도, 적응도를 모두 고려하여 홍수취약성을 객관적으로 평가할 수 있다는 장점이 있다.

$$d = \sqrt{(\text{Exp})^2 + (\text{Sen})^2 + (1 - \text{Adap})^2} \quad (6)$$

Fig. 3. Determining Flood Vulnerability using Euclidean Distance

3. 홍수취약성 평가를 위한 자료구축

3.1 세부지표 자료구축

본 연구에서는 IPCC에서 정의한 취약성 개념에 따라 평가지표를 기후노출, 민감도, 적응도로 구분하였으며, 각 평가지표에 대해 총 15개 세부지표를 선정하였다(Table 1).

기후노출(*Climate exposure*)은 강우 크기와 관련된 지표로, 최대 강우강도, 3시간 최대강우량, 10 mm/day 발생일수, 60 mm/3hr 이상 강우 발생일수를 활용하여 산정하였다. 최대 강우강도는 한 시간 내 최대 강우량 크기, 3시간 최대 강우량은 집중호우 발생 시 강우크기를 파악하기 위해 선정하였으며, 두 지표는 대상지역이 얼마나 큰 강우에 노출되어 있는지를 의미한다. 10 mm/day, 60 mm/3hr 발생일수는 지역이 작은 강우 또는 집중호우에 얼마나 자주 노출되고 있는지 파악하기 위해 선정한 지표이며, 3시간당 60 mm는 기상청의 호우주의보 발령 기준이다. 이때 작은 규모의 강우 발생일수를 파악하기 위해 10 mm/day를 기준으로 결정한 이유는 하루에 10 mm 정도의 적은 강우가 지속적으로 발생하게 되면 자치구는 이에 대응하기 위한 준비를 실시하기 때문이다. 기후노출의 세부지표 자료를 구축하기 위해서는 최근 5년간 서울특별시 내 25개 지점의 AWS 자료를 활용하였으며, Thiessen 가중치를 적용하여 면적평균 강우량을 산정하였다.

민감도(*Sensitivity*)는 홍수취약성에 대한 자치구 상태와

관련된 지표로, 불투수면적율, 평균경사, 인구밀도, 노후주택비율, 지하층가옥비율, 지역별 재산 밀집도를 활용하여 산정하였다.

적응도(*Adaptive capacity*)는 지역이 홍수에 대응할 수 있는 능력을 의미하는 지표로, 재정자립도, 우수관거 비율, 우수맨홀(받이) 비율, 예방대책추진 지수, 예방시설정비 지수를 활용하여 산정하였다. 예방대책추진 지수와 예방시설정비 지수는 지역의 자연재해 저감을 위한 행정적 노력도 및 예방시설(취약지역)정비와 관련된 지표로, 이는 행정안전부에서 지역안전도 진단 시 결정된 값 활용하여 객관성을 확보하고자 하였다.

평가지표별 세부지표 자료는 Table 1과 같이 기상자료와 통계자료를 활용하여 자료를 구축하였으며, 각 지표간의 상관계수는 최대 0.6으로 상관성이 낮은 것으로 판단된다. 이때 기후노출과 민감도는 홍수취약도와 비례하며, 적응도는 반비례하는 지표이다. 또한 각 세부지표는 상위 평가지표와 비례하지만 평균경사는 낮을수록 배수가 지체되어 홍수 위험이 높다고 할 수 있기 때문에 상위지표인 민감도와 반비례 관계인 지표이다.

선정한 세부지표의 자료구축 결과는 Fig. 4와 같다. 이때 Figs. 4의 (a)~(d)는 기후노출, (e)~(j)는 민감도, (k)~(o)는 적응도의 세부지표 자료구축 결과를 나타낸다. 기후노출 관련 세부지표를 보면 서울 강북구, 도봉구, 노원구 등 북부지역의 경우 최대 강우강도가 크고 강우 발생일수 또한 타 지역에 비해 높게 나타난다. 서울 강서구, 양천구, 구로구 등 서부지역은 강우가 자주 발생하지는 않으나 최대 강우강도가 큰 지역인 것으로 나타난다. 그 외 지역은 기후에 상대적으로 덜 노출되어 있는 것으로 확인되었다.

민감도 세부지표 자료를 보면 종로구, 중구 등 중부지역과 강남구, 송파구 등 남부지역은 불투수면적율이 높고 평균경사가 낮고 인구밀도나 표준공시지가가 높게 나타났으며 이는 빗물배수에 불리한 지형이며, 인구 및 재산 밀집도가 높은 지역이라고 할 수 있다. 또한 서울 북부와 서부지역은 노후주택 및 지하층가옥 비율이 대체로 높게 나타난다.

적응도 세부지표 자료에서는 서울 중부와 남부지역에서 모든 세부지표가 대체로 높게 나타나는 것을 확인하였다. 반면 서울 북부지역의 우수관거 비율이나 우수맨홀(받이) 비율이 낮은 것으로 나타난다.

4. 지역별 홍수취약성 평가

4.1 엔트로피 방법을 활용한 평가지표 지수 산정 결과

위에서 구축된 세부지표에 엔트로피 방법을 적용하여 평가지표별 세부지표의 가중치를 산정하였으며 그 결과는 Table 2와 같다. 평가지표로 구분하여 가중치를 산정한 결과 기후노출에서는 60 mm/3hr 이상 발생일수, 민감도는 노후주

Table 1. Sub-Indices for Flood Vulnerability

Division	Index	Sub-Index (Unit)	Source	Period
Flood vulnerability	Climate exposure	Maximum Rainfall Intensity (mm/hr)	KMA ¹⁾	2015 - 2019
		Maximum 3 hr Rainfall (mm/3hr)		
		Days over 10 mm/day (days)		
		Days over 60 mm/3hr (days)		
	Sensitivity	Rate of Impervious Area (%)	WAMIS ²⁾	2017
		Mean Slope* (%)	GIS Spatial Analysis	-
		Population Density (1/km ²)	KOSTAT ³⁾	2019
		Rate of Dilapidated Building (1/km ²)		
		Rate of Basement Building (1/km ²)		
		Officially Announce Land Price (Won/km ²)		
	Adaptive capacity*	Financial Independence Rate (%)	Ministry of the Interior and Safety	2017
		Rate of Storm Sewer (1/km ²)		
		Rate of Manhole (1/km ²)		
		Index for Prevention Plan (-)		
		Index for Prevention Facility (-)		

Note: 1) KMA: Korea Meteorological Administration

2) WAMIS: Water Resources Management Information System

3) KOSTAT: Statistics

* Inverse Proportion Index for High Ranking Index

Fig. 4. Sub-Index Data for Flood Vulnerability

Table 2. Entropy Weight for Sub-Index

Sub-Index	Weight
Maximum Rainfall Intensity	0.175
Maximum 3 hr Rainfall	0.255
Days over 10 mm/day	0.261
Days over 60 mm/3hr	0.309
Rate of Impervious Area	0.134
Mean Slope	0.123
Population Density	0.200
Rate of Dilapidated Building	0.196
Rate of Basement Building	0.208
Officially Announce Land Price	0.138
Financial Independence Rate	0.168
Rate of Storm Sewer	0.204
Rate of Manhole	0.243
Index for Prevention Plan	0.201
Index for Prevention Facility	0.185

태현황 비율, 적응도는 우수맨홀(받이) 비율의 가중치가 가장 높게 나타났다. 이는 해당 지표들의 자료 속성값의 분산이 작아 응집도가 크기 때문인 것으로 판단된다.

산정된 세부지표별 가중치를 합하여 각 평가지표 지수를 산정하였으며, 지역별 평가지표 지수는 Table 3 및 Fig. 5와 같다. 먼저 기후노출은 강우크기와 관련된 세부지표를 고려하여 지수를 산정하였으며, 홍수취약성과 비례하는 지표로 기후노출이 높을수록 홍수에 취약한 지역이라고 할 수 있다. 기후노출 지수 산정결과 Fig. 5에서 서울 도봉구나 강북구, 강서구 등 서울 북부와 서부지역에서 높게 산정되었다. 이러한 결과는 서울 북부지역에서 최대 강우강도가 크고 강우발생이 잦은 지역이기 때문이며, 서부지역 또한 최대 강우강도가 큰 지역이기 때문에 두 지역에서 기후노출이 높게 산정되었다.

민감도는 홍수취약성에 대해 지역 상태와 관련된 세부지표를 선정하여 평가하였으며, 홍수취약성과 비례하는 지표이다. 민감도 지수 산정 결과를 보면 동작구, 양천구, 강남구 등 서울 중부와 남부지역은 민감도가 높게 산정된 지역이다.

Table 3. Result of Indices for Vulnerability

Administrative Districts	Climate Exposure	Sensitivity	Adaptive Capacity
Gangnam-Gu	0.307	0.547	0.437
Gangdong-Gu	0.511	0.382	0.500
Gangbuk-Gu	0.610	0.188	0.378
Gangseo-Gu	0.545	0.426	0.298
Gwanak-Gu	0.379	0.251	0.403
Gwangjin-Gu	0.360	0.498	0.520
Guro-Gu	0.360	0.510	0.253
Geumcheon-Gu	0.208	0.387	0.412
Nowon-Gu	0.505	0.486	0.185
Dobong-Gu	1.000	0.448	0.185
Dongdaemun-Gu	0.529	0.616	0.644
Dongjak-Gu	0.259	0.642	0.376
Mapo-Gu	0.270	0.527	0.659
Seodaemun-Gu	0.376	0.391	0.325
Seocho-Gu	0.232	0.196	0.424
Seongdong-Gu	0.418	0.528	0.457
Seongbuk-Gu	0.506	0.338	0.218
Songpa-Gu	0.426	0.585	0.573
Yangcheon-Gu	0.496	0.673	0.460
Yungdeungpo-Gu	0.201	0.515	0.295
Yongsan-Gu	0.180	0.365	0.336
Eunpyeong-Gu	0.467	0.203	0.353
Jongno-Gu	0.280	0.113	0.472
Jung-Gu	0.153	0.589	0.550
Jungnang-Gu	0.539	0.504	0.385

Fig. 5. Result of Indices for Flood Vulnerability

이는 중부와 남부지역의 불투수면적율이 높고 한강분류가 지나가는 지역으로 평균경사가 낮아 지역의 배수가 지체되는 지역이기 때문이다. 또한 표준공시지가와 인구밀도가 높은 지역이기 때문에 민감도가 높게 산정되었다. 앞서 기후노출이 높게 산정되었던 서울 북부와 서부지역인 도봉구와 노원구, 강서구에서도 상대적으로 민감도가 높게 산정되었는데, 이는 노후주택 및 지하층 가옥비율이 높기 때문이다.

적응도는 지역이 홍수에 대응할 수 있는 능력을 의미하며 홍수취약성과 반비례하는 지표로 적응도가 낮을수록 홍수에 취약하다고 할 수 있다. 적응도는 지역별 재정자립도나 우수관거 비율 등 우수저감 시설, 지역안전지수를 고려하여 평가하였다. 평가 결과 서울 중부와 남부지역의 재정자립도가 높고, 우수저감 시설도 상대적으로 많은 편이며 지역안전지수 또한 높기 때문에 세부지표에 의하면 방재성능이 높은 지역으로 판단된다. 반면 기후노출과 민감도가 높게 산정된 서울 북부와 서부지역은 재정자립도가 낮고 지형특성으로 인해 우수관거 및 우수맨홀(받이) 비율이 낮아 적응도가 낮게 산정되어 방재성능이 다른 지역에 비해 낮은 지역으로 분석되었다.

4.2 유클리드 방법을 활용한 지역별 홍수취약성 평가

자치구별 홍수취약성 지수를 산정하기 위해 앞서 산정한 기후노출, 민감도, 적응도 지수를 유클리드 거리 산정방법에 적용하였다. 원점으로부터 기후노출, 민감도, 1-적응도까지의 유클리드 거리를 홍수취약도라고 정의하였으며, 그 결과는 Table 4와 같이 도봉구가 1.366, 노원구가 1.075로 25개 자치구 중 가장 홍수취약도가 높게 산정되었다. Fig. 6과 같이 도봉구와 노원구, 강북구, 성북구, 중랑구가 포함된 서울 북부와 강서구, 양천구, 구로구, 영등포구가 포함된 서부지역의 홍수취약도가 대체로 높게 산정된 것으로 확인되었다. 서울 북부와 서부지역은 최대 강우강도가 크고 강우가 잦게 발생하는 지역이기 때문에 기후노출이 가장 높고, 노후주택 및 지하층 가옥비율이 높아 민감도가 높은 지역이다. 반면에 적응도를 평가하기 위한 모든 지표(재정자립도,

우수관거비율, 맨홀비율, 예방대책지수, 예방시설정비지수)의 가중치가 상대적으로 낮게 산정되었다. 산정된 홍수 취약성 평가지표 지수에 따르면 이 지역들은 홍수 위험에 크게 노출되어 있지만 대응 능력은 낮아 홍수취약도가 가장 높게 산정된 것으로 분석되었다.

Table 4. Result of Flood Vulnerability for 25 Administrative Districts in Seoul

Administrative Districts	Flood Vulnerability
Gangnam-Gu	0.843
Gangdong-Gu	0.811
Gangbuk-Gu	0.892
Gangseo-Gu	0.985
Gwanak-Gu	0.751
Gwangjin-Gu	0.780
Guro-Gu	0.974
Geumcheon-Gu	0.734
Nowon-Gu	1.075
Dobong-Gu	1.366
Dongdaemun-Gu	0.887
Dongjak-Gu	0.932
Mapo-Gu	0.683
Seodaemun-Gu	0.866
Seocho-Gu	0.651
Seongdong-Gu	0.866
Seongbuk-Gu	0.991
Songpa-Gu	0.840
Yangcheon-Gu	0.995
Yungdeungpo-Gu	0.896
Yongsan-Gu	0.779
Eunpyeong-Gu	0.824
Jongno-Gu	0.609
Jung-Gu	0.757
Jungnang-Gu	0.961

Fig. 6. Flood Vulnerability for 25 Administrative Districts in Seoul

반면 Table 4에 따르면 종로구가 0.609, 서초구가 0.651, 마포구가 0.683으로 홍수취약도가 상대적으로 낮게 산정되었다. 이처럼 마포구, 용산구, 중구, 종로구, 성동구, 광진구가 포함된 서울 중부지역과, 서울 서초구, 관악구, 금천구, 강남구, 송파구, 강동구가 포함된 서울 남부 지역은 북부와 서부지역에 비해 홍수취약도가 대체로 낮게 산정된 지역이다. 이 지역은 불투수면적율이 높고 평균경사가 낮아 빗물배수에 불리한 지형이며, 표준공시지가가 높아 민감도가 높게 산정되었다. 하지만 두 지역은 기후노출이 적고, 중부지역은 적응도 평가지표 중 재정자립도, 맨홀비율, 예방시설정비지수가 높으며, 남부지역은 재정자립도, 우수관거비율, 예방대책지수가 높아 두 지역의 적응도 지수가 높기 때문에 홍수취약도가 상대적으로 낮은 지역으로 분석되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 집중호우가 빈번하게 발생하고 있고, 도시 지역에 내수침수로 인한 홍수피해가 증가함에 따라 서울특별시를 대상으로 홍수취약성을 평가하는 방안에 대해 제시하였다. 서울특별시는 25개 자치구가 밀집되어 있지만 지역별로 기후노출이나 지형특성, 인구 및 재산 밀집도, 방재성능 등이 다르기 때문에 지역별 홍수피해 특성이 상이하다. 그러므로 지역별로 기후, 방재, 지형 등 지역특성을 고려하여 홍수취약성을 분석하는 것이 필요하며, 다양한 방안들이 과거 선행연구에서 제시되고 있다.

본 연구에서는 홍수취약성을 평가하기 위해 IPCC 기후변화 취약성 평가 모델을 기반으로 평가지표를 정의하였다. 또한 지역별 특성을 고려하기 위해 기후노출 4개, 민감도 6개, 적응도 5개로 총 15개의 세부지표를 선정하였다. 이 세부지표의 가중치를 산정하고 이를 활용하여 평가지표별 지수를 산정하고자 엔트로피 방법을 활용하였다. 또한 산정된 평가지표별 지수를 유클리드 방법에 적용하여 지역별 홍수취약도를 산정하였다. 본 연구에서 제시한 방안은 연구

자의 주관으로 특정 지표에 가중치를 적용하지 않고, 수집된 통계자료의 속성값만을 활용한 수치적이며 객관적인 방안이라 판단된다.

지역별 홍수취약성 평가결과 서울 북부와 서부지역은 기후노출, 민감도가 높아 홍수위험이 높지만 적응도가 낮아 홍수취약도가 높게 산정되었다. 특히 북부지역은 노후주택 및 지하층 가옥 비율이 높아 홍수 피해가 크게 발생할 가능성이 높은 것으로 판단된다. 또한 지형특성으로 인해 우수관거와 맨홀 설치가 불가하고, 행정안전부에서 산정한 예방대책지수와 예방시설정비 지수가 타 지역에 비해 상대적으로 낮은 지역이다. 그러므로 이 지역은 노후주택 및 지하층 가옥 등 홍수에 취약한 건물에 대한 정비가 필요하며, 내수침수 재해 방지를 위한 예방시설과 저류시설의 보수 및 추가 설치와 같은 홍수피해 저감방안이 필요할 것으로 판단된다. 서울 중부와 남부지역은 민감도가 높게 산정되었지만 기후노출이 적고 적응도가 높아 홍수취약도는 낮게 산정되었다. 하지만 실제 서울 강남구와 종로구 등의 지역은 상습적으로 침수피해가 발생하고 있으며, 이 지역들에 대해 본 연구의 분석 결과와 실제 서울의 침수피해 이력은 상이하다. 이 지역에서 발생하는 침수는 대부분 우수배제가 제대로 이루어지지 못하여 발생하는 것이며, 방재성능이 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 방재성능을 고려하기 위하여 맨홀 및 우수관거 비율을 고려하였고, 서울 남부지역은 맨홀 비율이 낮고, 중부지역은 우수관거 비율이 낮은 것으로 분석되었다. 하지만 재정자립도 및 예방대책 지수, 예방시설정비 지수 등이 높아 이 지역의 적응도는 높게 산정되어 분석결과인 홍수취약도와 침수피해 이력이 상이한 것으로 판단된다. 이는 지역별 실제 홍수피해 이력을 나타낼 수 있는 정밀한 자료 수집이 가능하다면 정확도가 더 높은 결과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다. 본 연구의 결과는 각 지역별 홍수취약성을 저감을 위한 방안 수립, 계획 등에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물관리연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다(127569).

References

- Ha, J.H., Park, H.S., and Chung, G.H. (2019). Snow vulnerability analysis in Jeolla-do, South Korea using entropy theory. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 5, pp. 263-271.
- Han, W.S., and Park, T.S. (2014). Policy suggestions for improving the urban flood prevention system in Korea. *KRIHS Policy Brief*, Vol. 470.

- Han, J.S., and Cho, H.J. (2018). A study on cluster analysis of mixed data with continuous and categorical variables. *Journal of the Korean Data Analysis Society*, Vol. 20, No. 4, pp. 1769-1780.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge University Press, UK.
- Kim, J.S., Sung, H.H., and Choi, G.Y. (2013). Spatial patterns of urban flood vulnerability in Seoul. *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, Vol. 19, No 4, pp. 615-626.
- Ministry of Environment (ME). (2018). *2018 Flood damage situation*.
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). (1991). *Environmental indicators. A preliminary set*. Paris, France.
- Ouma, Y.O., and Tateishi, R. (2014). Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: Methodological overview and case study assessment. *Water*, Vol. 6, No. 6, pp. 1515-1545.
- Seo, K.H., and Lee, J.Y. (2011). *White Paper of Changma*. Korean Meteorological Administration.
- Shannon, C.E. (1948a). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, No. 3, pp. 379-423.
- Shannon, C.E. (1948b). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, No. 4, pp. 623-656.
- Shin, H.J., Choi, Y.J., and Yi, J.E. (2019). Analysis of the local characteristics of flood damage vulnerability in an urban area: The Han River basin. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 5, pp. 293-303.
- Song, J.H., Kim, S.D., Park, M.J., and Choi, H.I. (2013). Estimation of flood risk index for the Nakdong River watershed. *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 46, No. 1, pp. 35-45.

Received	September 9, 2020
Revised	September 10, 2020
Accepted	September 25, 2020