



Development for rainfall classification based on local flood vulnerability using entropy weight in Seoul metropolitan area

Lee, Seonmi^a · Choi, Youngje^b · Lee, Eunkyung^c · Ji, Jungwon^d · Yi, Jaeung^{e*}

^aPh.D Candidate, Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon, Korea

^bPh.D, Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon, Korea

^cPh.D, Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon, Korea

^dPh.D, Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon, Korea

^eProfessor, Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon, Korea

Paper number: 21-127

Received: 28 December 2021; Revised: 8 March 2022; Accepted: 18 March 2022

Abstract

Recently Flood damage volume has increased as heavy rain has frequently occurred. Especially urban areas are a vulnerability to flooding damage because of densely concentrated population and property. A local government is preparing to mitigate flood damage through the heavy rain warning issued by Korea Meteorological Administration. This warning classification is identical for a national scale. However, Seoul has 25 administrative districts with different regional characteristics such as climate, topography, disaster prevention state, and flood damage severity. This study considered the regional characteristics of 25 administrative districts to analyze the flood vulnerability using entropy weight and Euclidean distance. The rainfall classification was derived based on probability rainfall and flood damage rainfall that occurred in the past. The result shows the step 2 and step 4 of rainfall classification was not significantly different from the heavy rain classification of the Korea Meteorological Administration. The flood vulnerability is high with high climate exposure and low adaptability to climate change, and the rainfall classification is low in the northern region of Seoul. It is possible to preemptively respond to floods in the northern region of Seoul based on relatively low rainfall classification. In the future, we plan to review the applicability of rainfall forecast data using the rainfall classification of results from this study. These results will contribute to research for preemptive flood response measures.

Keywords: Urban flood, Flood vulnerability, Rainfall classification, Entropy method

엔트로피 가중치를 활용한 지역별 홍수취약도 기반의 서울지역 강우기준 산정기법

이선미^a · 최영제^b · 이은경^c · 지정원^d · 이재응^{e*}

^a아주대학교 건설시스템공학과 박사과정, ^b아주대학교 건설시스템공학과 박사, ^c아주대학교 건설시스템공학과 박사,

^d아주대학교 건설시스템공학과 박사, ^e아주대학교 건설시스템공학과 교수

요지

최근 국내에서는 집중호우로 인해 홍수피해가 자주 발생하고 있으며 피해규모가 증가하고 있다. 특히 도시지역은 인구와 재산이 밀집되어 있어 홍수에 매우 취약한 지역이며, 매년 하수관거 설계빈도 이상의 강우 발생 등으로 인해 내수침수 피해가 발생하고 있다. 각 지자체에서는 홍수피해 저감을 위해 기상청에서 전국적으로 동일한 강우기준에 따라 발령하는 호우특보를 통해 홍수피해 대비 및 대응을 실시하고 있다. 하지만 서울특별시 25개 자치구가 밀집되어 있지만 자치구별로 기후, 지형, 방재 등 지역특성 및 홍수피해 특성이 상이한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 서울특별시 25개 자치구를 대상으로 지역특성을 고려한 엔트로피 가중치 및 유클리드 거리를 활용하여 자치구별 홍수취약도를 산정하고, 확률강우량 및 과거 홍수피해 강우량을 기반으로 강우기준을 산정하였다. 그 결과 자치구별 2단계 강우기준은 기상청의 호우주의보 기준, 4단계 강우기준은 호우특보 기준과 크게 차이가 나지 않는 것으로 분석되었다. 또한 기후노출이 높고 적응도가 낮은 서울 북부지역이 상대적으로 홍수취약도가 높아 강우기준이 낮게 산정되었다. 이에 따라 서울 북부지역은 상대적으로 낮은 강우기준에 따라 선제적으로 홍수대응이 가능할 것으로 판단된다. 향후 지역특성 및 피해특성을 고려하여 산정된 자치구별 강우기준을 활용하여 기상예측자료의 적용성을 검토하고, 선제적인 홍수대응방안 마련을 위한 연구를 수행할 예정이다.

핵심용어: 도시침수, 홍수취약성, 강우기준, 엔트로피 가중치 산정방법

*Corresponding Author. Tel: +82-31-219-2507

E-mail: jeyi@ajou.ac.kr (J. Yi)

1. 서론

최근 국내에서는 이상기후 및 기후변화로 인하여 강우량 변동 폭이 커지고, 강우강도가 증가하고 있으며, 실제로 과거에 비해 시간당 50 mm 이상의 집중호우 발생횟수가 과거에 비해 약 1.5배 증가하였다(Kim *et al.*, 2020). 특히 2020년은 장기간으로 지속되었던 장마기간으로 인해 서울에서는 시간당 약 60 mm 이상의 강우가 발생하여 강남구에서는 시간당 최대 약 40 mm 강우가 발생하여 강남역을 중심으로 침수피해가 발생하였으며, 관악구에서는 침수피해 뿐만 아니라 도림천 범람으로 인해 인명피해가 발생하기도 하였다. 이처럼 최근 장기간으로 지속되는 집중호우 발생으로 인해 도로 및 건물침수, 하천범람, 재산피해 등이 자주 발생하고 있다.

집중호우로 인한 피해발생 빈도는 전국적으로 증가하고 있지만 특히 도시지역은 인구와 재산이 밀집되어 있기 때문에 홍수피해에 매우 취약하다. 서울특별시에서는 최근 10년 동안 강남역과 광화문 등 많은 지역에 하수관 역류 등으로 인한 도로침수 피해가 발생하였으며, 2011년에는 집중호우로 인해 서초구에 우면산 산사태가 발생하여 많은 인명 및 재산 피해가 발생하기도 하였다. 이처럼 도시지역에서 발생하는 피해는 홍수피해 상황조사 결과에 따르면 집중호우에 의한 직접적인 피해도 있지만 대체로 하수관거 설계빈도 이상의 강우로 인해 내수침수 피해가 자주 발생하는 것으로 나타난다(ME, 2018). 도시지역에서 발생하는 홍수피해는 내수침수보다는 하천범람 피해가 발생하였던 과거와 달리 최근 볼투수성이 증가함으로 인해 내수가 배제되지 못하여 침수가 되는 피해양상으로 변화하고 있다(Shim and Choi, 2012).

현재 각 지자체에서는 집중호우로 인한 홍수피해 저감을 위해 기상청에서 발령하는 호우특보에 따라 홍수피해에 대비, 대응을 실시하고 있다. 기상청에서는 호우특보를 호우주의보, 호우경보로 구분하여 지속시간 3시간 강우량이 60 mm 이상인 경우 호우주의보, 90 mm 이상인 경우 호우경보를 발령하고 있고, 이 발령기준은 전국적으로 동일하다. 하지만 각 지역별로 강우발생에 대한 방재특성, 지형특성 등이 상이하기 때문에 동일한 규모의 강우가 발생하는 경우에도 피해규모 및 특성이 상이한 실정이다. 이에 따라 지자체별 홍수저감을 위해서는 각 지역특성을 고려하여 지역별 상황에 적합한 강우기준을 수립하는 것이 필요하다.

지역특성을 고려하여 홍수취약성을 분석하기 위해 국내에서는 다양한 선행연구들이 수행되었다. Shin *et al.* (2019)은 한강권역 도시지역을 대상으로 홍수취약성 평가지표를 선정하여 군집분석 및 주성분분석을 활용하여 지역별 특성에 따라

홍수취약성을 평가하였고, Kim *et al.* (2012)는 공간적 홍수취약성을 산정하기 위해 Fuzzy TOPSIS (Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution)의 결과를 TOPSIS 및 가중합계법에 적용하였다. Song *et al.* (2013), Hwang *et al.* (2019)은 P-S-R (Pressure-State-Response) 구조에 따라 세부 지표를 선정하였으며, 엔트로피 방법 및 AHP (Analytic Hierarchy Process) 방법 등을 통해 지표별 가중치를 산정하여 단순평균법 등을 통해 대상지역의 홍수취약성 분석방안을 제시하였다. 국외에서는 Dapeng *et al.* (2012)은 자료포락곡선 모델을 활용하여 홍수취약성을 평가하였으며, Ouma and Tateishi (2014)는 도시지역을 대상으로 AHP 기법 및 GIS (Geographic Information System) 공간분석을 통해 홍수취약성을 평가한 결과를 활용하여 홍수위험지도 분석하였다.

지역별 홍수대응방안을 제시할 목적으로 강우기준을 제시하기 위해 국내에서는 Kim *et al.* (2011)이 과거 강우자료를 통해 강우특성을 분석한 결과에 따라 기상청에서 제시한 호우특보 기준을 개선하기 위한 방안을 제시하였으며, Choi and Yi (2019)은 도시지역의 홍수위험도 예측 방안 제시를 위해 X축을 과거 홍수피해를 기반으로 강우기준을 산정하여 강우 예측자료를 적용하였다. 국외에서는 Hiren and James (2017)은 인도의 극한호우에 대응하기 위해 백분율에 따라 총 4단계의 강우 임계값을 산정하는 연구를 수행하였다.

기존 선행연구에서는 홍수취약도 분석을 위해 취약성 모델에 따른 지표를 선정하여 가중치를 산정하는 방안들이 제시되어 왔다. 하지만 가중치 산정 시 단순평균법, AHP 기법 등을 활용하는 것은 연구자의 주관으로 인해 정확도가 낮아지는 문제가 발생할 수 있으며, 이에 따라 객관적인 홍수취약도 평가 결과를 도출하기 위한 방안이 필요하다.

본 연구에서는 기상청에서 전국적으로 동일한 기준으로 호우특보를 발령함에 따라 인구와 재산이 밀집되어 있어 홍수피해에 취약한 지역인 서울특별시를 대상으로 자치구별 홍수취약도를 분석한 결과에 따라 강우기준을 산정하는 방안을 제시하고자 하였다. 서울특별시 자치구별 홍수취약도를 분석하기 위해서는 엔트로피 가중치 산정방법 및 유클리드 거리 산정방법을 접목시켜 연구자의 주관은 배제하고 홍수취약도를 산정하였다. 또한 자치구별 강우기준을 산정하기 위해 5년, 10년, 30년 빈도의 확률강우량 및 과거 홍수피해 강우량을 기반으로 홍수취약도 산정결과를 활용하였으며, 실제 홍수피해사례를 통해 자치구별 강우기준의 적용성을 평가하였다.

2. 대상지역 및 연구방법

2.1 대상지역

본 연구에서는 도시지역인 서울특별시를 대상으로 자치구별 홍수취약도를 고려하여 강우기준을 산정하였다. 서울특별시는 전체 면적의 60% 이상 도시화가 진행되고 있기 때문에 집중호우 발생 시 빗물배수에 불리하여 매년 내수침수 피해가 발생하는 지역이다. Fig. 1과 같이 25개 자치구가 밀집되어 있는 서울은 자치구별 인구, 지형, 방재특성 등이 상이하기 때문에 홍수피해 특성이 각각 다르다. 하지만 각 자치구는 전국적으로 동일한 기준에 따라 발령되는 기상청의 호우특보에 따라 홍수에 대비한다. 이에 따라 본 연구에서는 자치구별 지역특성 등을 고려한 홍수취약도와 과거 홍수피해를 기반으로 자치구 상황에 적합한 강우기준을 산정하는 방안을 제시하였다.

2.2 홍수취약도 평가 모델

홍수취약도를 평가하기 위해서는 Organization for Economic Cooperation and Development (OECD)에서 정의한 Pressure-State-Response (PSR) 체계와 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)에서 정의한 기후변화 취약성 모델이 주로 활용된다. OECD에서 정의한 PSR 체계는 압력지수(PI), 현상지수(SI), 대책지수(RF)로 구분하여 어떤 사상의 원인, 사상으로 인한 현상, 사상에 대한 피해를 저감시키기 위한 활동으로 취약성을 평가하는 체계이다(OECD, 1991). IPCC는



Fig. 1. 25 Administrative districts in Seoul

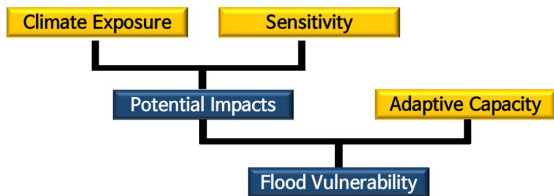


Fig. 2. Flood vulnerability

기후변화에 대한 대책을 마련하기 위해 설립된 UN 산하의 국제 협의체이며, 기후변화 취약성을 기후노출, 민감도, 적응도로 정의하였다. 기후노출이란 어떤 시스템이 기후에 얼마나 노출되어 있는지로 정의되며, 민감도는 기후노출에 대한 어떤 시스템의 민감성 정도, 적응도는 기후노출에 대한 시스템의 적응 능력으로 정의된다(IPCC, 2001). 본 연구에서는 IPCC에서 정의한 기후변화 취약성 모델의 개념을 활용하여 홍수취약도를 평가하기 위한 인자로 Fig. 2와 같이 기후노출, 민감도, 적응도로 구분하였다.

2.3 엔트로피 가중치 산정방법

자치구별 홍수취약도를 산정하기 위해서는 지역특성을 고려할 수 있는 가중치를 활용하였으며, 주로 자료를 바탕으로 가중치를 산정하기 위해서는 엔트로피 가중치 산정방법, AHP 기법 등이 적용된다. 본 연구에서는 엔트로피 가중치를 활용하여 자치구별 평가인자 지수를 산정하였다. 엔트로피 방법은 지표의 속성정보를 분석하여 Shannon의 정보이론을 바탕으로 가중치를 도출할 수 있는 방법이다. 엔트로피란 정보 속성의 다양성을 의미하며, 속성의 분산이 클수록 가중치는 낮게 산정된다(Shannon, 1948). Lee et al. (2015)에 따르면 엔트로피 가중치를 활용하는 방법은 델파이 기법 및 AHP 기법의 한계점인 연구자의 주관성을 배제하여 정량적 자료의 속성을 반영한 가중치를 산정할 수 있다는 장점이 있다.

엔트로피 방법을 활용하여 가중치를 산정하기 위한 방법은 다음과 같다.

첫째, Eq. (1)과 같이 자료를 활용하여 행렬(D)을 구성한다. 행렬은 세부지표의 개수(n)와 분석하고자 하는 지역의 개수(m)를 고려한다.

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

둘째, 자료속성의 단위가 서로 상이하기 때문에 자료의 정규화가 필요하다. 자료를 정규화하기 위한 방법으로는 주로 MIN-MAX 방법, Z-Score 방법 등이 활용된다. 본 연구에서는 지표별 자료가 0에서 1 사이의 범위를 갖도록 하기 위해 Eq. (2)와 같이 MIN-MAX 방법을 활용하였다. 이때 p는 각 지표별 값을 정규화한 값을 의미한다.

$$p_{i,j} = \frac{x_{i,j} - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

셋째, 데이터를 0에서 1사이의 범위를 갖도록 정규화한 후 지표별 엔트로피 값(E_j)을 Eq. (3)과 같이 산정한다. 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, 엔트로피 값을 산정한 후 Eqs. (4) and (5)와 같이 지표 속성 값의 다양성(d_j)과 가중치(w_j)를 산정한다.

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

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

2.4 유클리드 거리 산정방법

본 연구에서는 홍수취약성을 기후노출, 민감도, 적응도로 정의하였으며, 유클리드 거리 산정방법을 활용하여 자치구별 홍수취약도를 산정하였다. 유클리드 거리란 유클리드 공간 내에서 두 좌표 사이의 거리를 의미한다. 유클리드 거리 개념은 자료 속성 간의 거리로 데이터를 분석하는 군집분석에 활용되는 개념으로 이처럼 자료를 분석하는 경우 주로 활용되며, 행정안전부에서는 유클리드 거리에 따라 지역별 지역안전지수를 산정한다(ME, 2018).

유클리드 거리를 활용하여 홍수취약도를 산정하기 위해서는 Fig. 3과 같이 엔트로피 가중치를 활용하여 산정된 기후노출(Exp), 민감도(Sen), 1-적응도(Adap) 지수 3차원 좌표를 구성하고, 원점(0,0,0)을 홍수취약성이 가장 낮은 이상적인 안전지역으로 설정한다. 또한 Eq. (6)과 같이 대상지역의 좌표까지 거리(d)를 홍수취약도라고 정의한다. 유클리드 거리

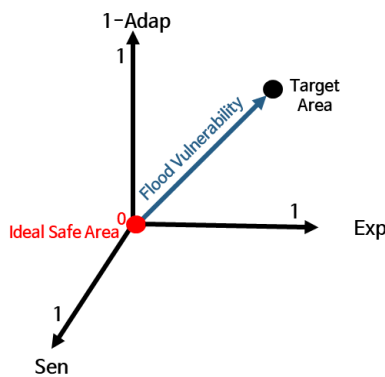


Fig. 3. Flood vulnerability using euclidean distance

산정방법을 활용하여 홍수취약도를 산정하는 방안은 각 평가인자에 주관적인 가중치를 부여하지 않고 객관적으로 산정할 수 있다는 장점이 있다.

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

3. 자치구별 홍수취약도 평가

3.1 평가인자별 세부인자 선정

본 연구에서는 자치구별 평가인자인 기후노출, 민감도, 적응도를 고려하여 홍수취약도를 산정하기 위해 Table 1과 같이 총 15개의 세부인자를 선정하였다. 선정된 세부인자는 Shin et al. (2019)가 한강권역 도시지역을 대상으로 기후노출, 민감도, 적응도에 따라 홍수취약성을 분석하기 위해 선정한 세부인자 및 서울특별시 지역별 기후, 방재 등 특성을 고려하여 선정하였다.

기후노출(Climate Exposure)은 대상지역이 강우에 노출되어 있는 정도를 의미하며 기후와 관련된 평가인자로 홍수취약도와 비례한다. 기후노출을 평가하기 위해 세부인자는 최대 강우강도, 3시간 최대강우량, 10 mm/day 이상 발생일수, 60 mm/3hr 발생일수를 선정하였다. 이 중 최대 강우강도 및 3시간 최대강우량은 대상지역에 단시간동안 얼마나 큰 강우강도의 호우가 발생하는지를 파악하기 위한 인자이다. 60 mm/3hr는 기상청의 호우주의보 기준으로 호우주의보의 발령일수를 파악할 수 있는 인자이며, 10 mm/day는 작은 강우일지

Table 1. Indices for flood vulnerability

Index	Sub-Index	Unit	Period
Climate exposure	Maximum Rainfall Intesity	mm/hr	2016-2020
	Maximum 3 hr Rainfall	mm/3hr	
	Days over 10 mm/day	days	
	Days over 60 mm/3hr	days	
Sensitivity	Rate of Impervious Area	%	2017
	Mean Slope	%	-
	Population Density	1/km ²	2020
	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	%	2017
	Rate of Storm Sewer	1/km ²	
	Rate of Manhole	1/km ²	
	Index for Prevention Plan	-	
	Index for Prevention Facility	-	

라도 자주 발생한다면 위험이 있기 때문에 대상지역이 강우 위험에 얼마나 노출되어 있는지 파악하기 위한 인자이다. 기후 노출을 평가하기 위해서는 기상청에서 제공하고 있는 서울특별시 내 27개 AWS (Automatic Weather Station) 지점을 활용하였으며, 지점별 최근 5년(2016년~2020년) 동안의 강우자료를 수집하여 면적평균강우량을 산정하였다.

민감도(Sensitivity)는 대상지역이 강우에 대해 민감한 정도를 의미하며 지형, 인구 등과 같은 지역특성과 관련된 평가인자로 홍수취약도와 비례한다. 민감도를 평가하기 위해 세부인자는 불투수면적율과 평균경사, 인구밀도, 노후화 주택 비율, 지하층 가옥 비율, 표준공시지가 등을 선정하였다. 평균경사는 낮을수록 빗물 배수에 불리할 가능성이 높기 때문에 평가인자인 민감도와 반비례하는 세부인자이다. 민감도 세부인자를 평가하기 위해 2020년 기준의 통계자료를 활용하였으며, 평균경사는 수치표고자료를 적용하여 GIS 지형분석을 통해 산정하였다.

적응도(Adaptive Capacity)는 대상지역에 홍수피해가 발생했을 때 적응할 수 있는 능력을 의미하며 방재특성과 관련된 평가인자로 홍수취약도와 반비례한다. 적응도를 평가하기 위해 세부인자는 재정자립도, 우수관거 비율, 맨홀비율, 예방대책추진 지수, 예방시설정비 지수 등을 선정하였다. 적응도의 세부인자 평가를 위해서는 2020년 기준의 하수도 정비 계획 등과 같은 통계자료를 활용하였으며, 이 중 예방대책추진 및 예방시설정비 지수는 2017년에 행정안전부에서 지역별 지역안전도 지수를 산정한 결과를 활용하였다.

3.2 자치구별 평가인자 지수 및 홍수취약도 산정

3.2.1 엔트로피 가중치를 활용한 평가인자 지수 산정

자치구별 홍수취약도를 산정하기 위해 Table 2와 같이 산정된 엔트로피 가중치를 활용하여 평가인자별 세부인자 지수를 산정하였으며, Table 3와 같이 세부인자 지수의 합으로 자치구별 평가인자 지수를 산정하였다.

Table 2. Result of entropy weight for indices

Administrative districts	Climate Exposure				Sensitivity						Adaptive Capacity				
	CE1*	CE2*	CE3*	CE4*	S1	S2	S3	S4	S5	S6	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5
Gangnam-Gu	0.025	0.145	0.039	0.103	0.079	0.080	0.071	0.076	0.121	0.136	0.157	0.073	0.014	0.139	0.026
Gangdong-Gu	0.111	0.160	0.118	0.132	0.073	0.106	0.120	0.061	0.031	0.025	0.045	0.081	0.038	0.146	0.141
Gangbuk-Gu	0.162	0.229	0.157	0.096	0.000	0.000	0.065	0.043	0.030	0.004	0.004	0.057	0.034	0.178	0.114
Gangseo-Gu	0.161	0.107	0.065	0.216	0.075	0.104	0.074	0.000	0.053	0.005	0.023	0.004	0.002	0.091	0.055
Gwanak-Gu	0.019	0.183	0.013	0.060	0.002	0.004	0.101	0.032	0.042	0.024	0.015	0.051	0.021	0.144	0.142
Gwangjin-Gu	0.102	0.130	0.078	0.030	0.091	0.077	0.135	0.069	0.040	0.030	0.045	0.139	0.085	0.123	0.145
Guro-Gu	0.086	0.122	0.078	0.089	0.080	0.085	0.133	0.094	0.089	0.008	0.027	0.112	0.060	0.000	0.076
Geumcheon-Gu	0.006	0.138	0.000	0.014	0.080	0.063	0.111	0.068	0.049	0.007	0.038	0.122	0.109	0.150	0.000
Nowon-Gu	0.116	0.229	0.092	0.076	0.026	0.046	0.082	0.167	0.148	0.003	0.000	0.000	0.005	0.067	0.069
Dobong-Gu	0.181	0.267	0.262	0.290	0.016	0.044	0.091	0.109	0.088	0.000	0.011	0.055	0.041	0.078	0.036
Dongdaemun-Gu	0.107	0.168	0.065	0.183	0.118	0.103	0.172	0.096	0.103	0.021	0.032	0.242	0.151	0.183	0.162
Dongjak-Gu	0.008	0.130	0.026	0.046	0.093	0.061	0.170	0.078	0.118	0.028	0.046	0.127	0.085	0.071	0.107
Mapo-Gu	0.116	0.084	0.013	0.068	0.101	0.095	0.090	0.044	0.111	0.060	0.068	0.109	0.047	0.197	0.181
Seodaemun-Gu	0.167	0.130	0.078	0.066	0.066	0.031	0.110	0.070	0.072	0.022	0.033	0.117	0.074	0.131	0.026
Seocho-Gu	0.034	0.145	0.026	0.062	0.021	0.042	0.027	0.034	0.027	0.070	0.167	0.009	0.000	0.044	0.120
Seongdong-Gu	0.077	0.145	0.078	0.125	0.122	0.093	0.107	0.063	0.079	0.034	0.073	0.095	0.070	0.104	0.145
Seongbuk-Gu	0.155	0.214	0.092	0.081	0.052	0.040	0.111	0.050	0.044	0.013	0.018	0.130	0.050	0.042	0.012
Songpa-Gu	0.090	0.099	0.065	0.102	0.097	0.114	0.129	0.108	0.094	0.054	0.094	0.071	0.020	0.141	0.061
Yangcheon-Gu	0.179	0.099	0.078	0.141	0.094	0.100	0.190	0.228	0.138	0.018	0.040	0.123	0.077	0.059	0.140
Yungdeungpo-Gu	0.000	0.130	0.000	0.008	0.129	0.118	0.089	0.089	0.090	0.030	0.087	0.128	0.049	0.095	0.029
Yongsan-Gu	0.037	0.061	0.013	0.067	0.117	0.082	0.041	0.073	0.019	0.075	0.101	0.077	0.044	0.033	0.091
Eunpyeong-Gu	0.113	0.176	0.118	0.115	0.017	0.013	0.095	0.034	0.003	0.013	0.009	0.058	0.023	0.147	0.036
Jongno-Gu	0.080	0.191	0.065	0.000	0.033	0.005	0.000	0.025	0.000	0.062	0.134	0.059	0.033	0.092	0.123
Jung-Gu	0.052	0.000	0.052	0.040	0.095	0.072	0.061	0.046	0.199	0.130	0.162	0.224	0.213	0.101	0.012
Jungnang-Gu	0.114	0.214	0.065	0.123	0.058	0.067	0.145	0.054	0.050	0.009	0.007	0.155	0.082	0.162	0.036

*CE: Indices of Climate Exposure, *S: Indices of Sensitivity, *AC: Indices of Adaptive Capacity

Table 3. Result of indices

Administrative districts	Climate Exposure	Sensitivity	Adaptive Capacity
Gangnam-Gu	0.312	0.563	0.409
Gangdong-Gu	0.521	0.414	0.451
Gangbuk-Gu	0.644	0.142	0.387
Gangseo-Gu	0.549	0.311	0.175
Gwanak-Gu	0.276	0.205	0.374
Gwangjin-Gu	0.340	0.442	0.536
Guro-Gu	0.375	0.489	0.276
Geumcheon-Gu	0.158	0.379	0.420
Nowon-Gu	0.513	0.471	0.141
Dobong-Gu	1.000	0.348	0.221
Dongdaemun-Gu	0.524	0.611	0.769
Dongjak-Gu	0.210	0.548	0.435
Mapo-Gu	0.281	0.500	0.601
Seodaemun-Gu	0.441	0.372	0.381
Seocho-Gu	0.268	0.222	0.340
Seongdong-Gu	0.426	0.498	0.486
Seongbuk-Gu	0.542	0.309	0.253
Songpa-Gu	0.357	0.595	0.387
Yangcheon-Gu	0.498	0.767	0.439
Yungdeungpo-Gu	0.138	0.543	0.388
Yongsan-Gu	0.177	0.407	0.345
Eunpyeong-Gu	0.521	0.175	0.274
Jongno-Gu	0.336	0.125	0.442
Jung-Gu	0.145	0.603	0.713
Jungnang-Gu	0.516	0.383	0.442

기후노출 지수 산정 결과 도봉구와 노원구, 강북구 등이 포함된 서울 북부지역과 강서구, 서대문구 등이 포함된 서울 서부지역에서 대체로 높게 산정되었다. 이 지역들은 최대 강우강도가 높고 3시간 최대강우량이 높아 단시간에 큰 강우가 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 서울 북부지역은 하루에 10mm 이상의 강우 발생일수가 많은 지역이기 때문에 기후노출이 높게 산정된 것으로 판단된다.

민감도 지수 산정 결과 강남구, 양천구 등을 포함하는 서울 중부지역과 남부지역에서 높게 산정된 것으로 분석되었다. 이 지역들은 상대적으로 평균경사가 낮고 불투수율이 높아 빗물배수에 불리한 지형조건을 갖고 있으며, 인구밀도 및 노후주택비율 민감도가 높게 산정되는 것으로 나타난다.

적응도 지수 산정 결과 동대문구, 중구 등을 포함하는 서울 중부지역과 남부지역에서 높게 산정된 것으로 분석되었다. 이 지역들은 재정자립도가 높고 우수관거 및 맨홀 비율이 높

Table 4. Result of flood vulnerability

Administrative districts	Flood Vulnerability
Gangnam-Gu	0.874
Gangdong-Gu	0.863
Gangbuk-Gu	0.901
Gangseo-Gu	1.039
Gwanak-Gu	0.714
Gwangjin-Gu	0.726
Guro-Gu	0.951
Geumcheon-Gu	0.711
Nowon-Gu	1.106
Dobong-Gu	1.314
Dongdaemun-Gu	0.837
Dongjak-Gu	0.814
Mapo-Gu	0.699
Seodaemun-Gu	0.846
Seocho-Gu	0.746
Seongdong-Gu	0.832
Seongbuk-Gu	0.973
Songpa-Gu	0.926
Yangcheon-Gu	1.073
Yungdeungpo-Gu	0.830
Yongsan-Gu	0.791
Eunpyeong-Gu	0.911
Jongno-Gu	0.664
Jung-Gu	0.683
Jungnang-Gu	0.851

아 우수저감 능력이 높은 지역이다. 또한 행정안전부에서 산정한 지역안전도 지수가 상대적으로 높기 때문에 적응도가 높게 산정되는 것으로 판단된다.

3.2.2 유클리드 거리를 활용한 자치구별 홍수취약도 산정

자치구별 홍수취약도 산정을 위해서는 엔트로피 가중치를 활용하여 산정한 평가인자별 지수를 유클리드 거리 산정방법에 적용하였다. 원점으로부터 평가인자 지수로 이루어진 좌표까지의 거리를 홍수취약도로 정의하였으며, 산정된 자치구별 홍수취약도는 Table 4와 같다.

홍수취약도 산정 결과 도봉구, 노원구 등이 포함된 서울 북부지역은 강우강도가 높고 강우가 자주 발생하여 기후노출이 높게 산정된 반면 지형조건으로 인해 우수관거 및 맨홀 설치에 어려움이 있어 적응도가 낮게 산정되어 홍수취약도가 높게 산정되었다. 또한 강남구, 종로구 등이 포함된 서울 중부와 남부지역은 불투수면적율, 인구밀도 등이 높아 민감도가 높게

산정되었다. 하지만 기후노출이 낮고, 우수저감 시설 비율 등이 높으며 재정자립도가 매우 높아 적응도가 높게 산정되어 홍수취약도가 상대적으로 낮게 산정된 지역이다.

4. 지역별 강우기준 도출 및 적용성 평가

4.1 과거 홍수피해 기반의 자치구별 강우기준 산정

4.1.1 자치구별 강우기준 산정을 위한 확률강우량 검토

본 연구에서는 자치구별 지역특성을 고려하여 분석한 홍수취약도에 따라 확률강우량을 활용하여 강우기준을 도출하였다. 확률강우량은 국토교통부에서 전국적으로 제공하고 있으며, 강우자료를 확률 분포형 모형에 적용하여 빈도해석을 통해 산정된다. 지자체별로 확률강우량은 다르게 산정되어 있지만 서울특별시 25개 자치구의 확률강우량은 동일하게 산정되었다.

자치구별 강우기준 산정을 위해 활용한 확률강우량은 Table 5와 같으며, 확률강우량 5년 빈도는 하수관거 지선의 설계빈도, 10년 빈도는 하수관거 간선의 설계빈도, 30년 빈도는 소하천의 설계빈도이다. 도시지역에서 홍수피해는 대체로 설계빈도 이상의 강우가 발생함으로 인해 하수관 역류 및 소하천 범람 등으로 인해 발생한다. 또한 본 연구에서는 3시간 지속시간의 확률강우량을 활용하였다. 기상청에서는 지속시간 3시간과 12시간 강우량에 따라 호우특보를 발령하고 있으며, 집중호우가 발생할 때 3시간 이상 지속되는 경우 홍수피해는 유출 특성이 반영되기 때문에 강우에 의한 피해보다는 홍수량에 의한 피해일 확률이 높다(Choi and Kim, 2020). 이에 따라 본 연구에서는 지속시간 3시간의 5년, 10년, 30년 빈도의 확률강우량을 활용하여 도시지역에서 발생하는 홍수피해 특성을 반영하고자 하였다.

4.1.2 과거 홍수피해 강우량을 고려한 강우비율 산정 및 적용

자치구별 피해특성을 고려하여 강우기준을 산정하기 위해 확률강우량을 검토하였으며, 과거 서울특별시에서 발생한 홍수피해 강우량을 활용하였다. 확률강우량과 과거 홍수피해 강우량을 접목시키기 위해서는 단계별 피해강우량과 확률강

Table 5. Rainfall frequency for setting rainfall classification

Rainfall Frequency	Probable Rainfall (mm/3hr)	Note
5 years	116.7	Design Frequency of Local Sewer
10 years	138.4	Design Frequency of Main Sewer
30 years	171.3	Design Frequency of Small River

우량의 평균값을 활용하였으며, 이를 강우비율이라 정의하였다. 이때 피해강우량은 재해연보 2010년~2020년 동안 발생한 호우피해 사상의 피해현상 자료를 활용하였다. 재해연보는 행정안전부에서 제공하고 있는 재난정보자료로 호우, 강풍, 태풍 등 재난유형별 피해기간, 피해액 등 정보가 포함되어 있다.

홍수피해 강우량은 피해규모에 따라 1단계에서 4단계로 구분하여 활용하기 위해 재해연보에 제시되어 있는 호우피해 사상별 피해규모를 Choi and Kim (2020)이 개발한 국내 홍수피해현상표(Table 6)를 기준으로 구분하였다. 국내 홍수피해현상표는 호우로 인해 발생하는 피해현상을 Level 1~Level 4로 구분한 표이며, 이는 영국의 홍수피해현상표를 기반으로 홍수대책 매뉴얼 등을 참고하여 국내 실정에 적합하게 개발되었다.

2010년부터 서울에서 발생한 홍수피해 기간별 피해현상은 Table 7과 같이 침수피해, 맨홀역류 등이 대부분이며, 2011년에는 우면산 산사태가 발생하기도 하였다. 이와 같이 피해현상을 기반으로 피해규모를 구분하였으며, 지속시간 3시간 동안 39 mm 강우가 발생하는 경우 큰 물웅덩이로 인해 침수발생 위험이 높고, 71 mm 강우가 발생하는 경우 도로 및 주택에 침수피해가 발생할 가능성이 높으며, 104 mm 이상의 강우가 발생하는 경우 맨홀 역류 등의 피해가 발생할 가능성이 높은 것으로 분석되었다.

확률강우량과 피해강우량을 고려하기 위한 목적으로 정의한 강우비율을 산정하기 위해 단계별 확률강우량 대비 최소 피해 강우량의 비율을 산정하였으며, Eq. (7)에 따라 단계

Table 6. Flood impact table

Level	Damage Phenomenon
Level 1	<ul style="list-style-type: none"> • If it rains for a long time, clothes get wet • Small puddle in the ground • Needs Inspection in building • Some assets are flooded
Level 2	<ul style="list-style-type: none"> • If you walk, your pants get wet • Big puddle in the ground • Concerns about farmland and asset damage caused by local flooding
Level 3	<ul style="list-style-type: none"> • Even if I have an umbrella, my clothes get wet • Inundation occurs • A small streams overflow • Road are blocked due to flooding • Damage to buildings / structures
Level 4	<ul style="list-style-type: none"> • Rains so much. You can not see ahead • Large areas are flooded • The water overflows from the manhole • The car floods in water • Possibility of collapse in building / structure

Table 7. Flood damage in Seoul

Date	Rainfall (mm/3hr)	Level	Damage Phenomenon
2010.08.13.-2010.08.18	39	2	• Big puddle in the ground
2011.06.21.-2011.07.03	65	2	• Big puddle in the ground
2011.07.07.-2011.07.16	54	2	• Big puddle in the ground
2012.07.13.-2012.07.13	71	3	• Inundation occurs
2012.07.05.-2012.07.06	95	3	• Inundation occurs
2013.07.11.-2013.07.15	99	3	• Inundation occurs
2016.07.01.-2016.07.07	85	3	• Inundation occurs
2017.07.02.-2017.07.11	93	3	• Breast wall collapse • Inundation occurs
2010.09.21.-2010.09.22	174	4	• Inundation occurs • The water overflows from the manhole
2011.07.26.-2011.07.29	125	4	• Inundation occurs • Landslides occur on Woomyeon mountain. • The water overflows from the manhole
2012.08.14.-2012.08.16	112	4	• Inundation occurs • The water overflows from the manhole
2013.07.22.-2013.07.23	130	4	• Inundation occurs • The water overflows from the manhole
2018.08.26.-2018.09.01	116	4	• Inundation occurs • The water overflows from the manhole
2020.07.28.-2020.08.11	104	4	• Inundation occurs • A small streams overflow • The water overflows from the manhole

별 비율의 평균값으로 강우비율을 산정하였다. 강우비율 산정결과는 Table 8과 같이 0.485로 산정되었으며, 이는 과거 피해이력에 기반하여 확률강우량의 약 48% 강우가 발생하는 경우 서울에 강우피해가 발생할 확률이 높은 것으로 분석되었다.

$$Rainfall\ Ratio = \frac{\sum_{i=2}^4 \left(\frac{Damage\ Rainfall}{Probable\ Rainfall} \right)}{3} \quad (7)$$

Table 8. Result of rainfall ratio

Level	Damage Rainfall (mm/3hr)	Probable Rainfall (mm/3hr)	Rainfall Ratio (D.R / P.R)	Probable Rainfall × 0.485 (mm/3hr)
Level 2	39.0	116.7	0.334	56.6
Level 3	71.0	138.4	0.513	67.1
Level 4	104.0	171.3	0.607	83.0
Average	-	-	0.485	68.9

강우비율과 확률강우량을 활용하여 산정된 강우기준을 홍수취약도에 따라 분배하는 방안으로 자치구별 1단계, 2단계, 3단계, 4단계의 강우기준을 산정하였다. 1단계 강우기준은 실제 피해가 발생하지 않지만 피해 대비를 위해 관심을 갖고 있어야 하는 단계로 정의하였으며, 2단계부터 4단계 강우기준은 강우 피해가 발생하며 피해규모가 증가하는 단계로 정의하였다. 이에 따라 1단계 강우기준은 3시간 강우가 지속되는 경우 피해가 발생하지 않을 정도의 강우인 5 mm/3hr로 설정하였다. 또한 홍수취약도 산정 결과에 따라 취약성이 높은 것으로 분석되는 지역은 다른 지역에 비해 강우기준을 낮게 설정하여 홍수피해에 선제적으로 대응하여야 한다. 이에 따라 홍수취약도의 역수를 활용하여 2단계-4단계 강우기준을 Fig. 4 및 Table 9와 같이 산정하였다.

25개 자치구의 강우기준 산정결과에 따르면 강우기준이 가장 낮게 산정된 도봉구의 4단계 강우기준은 기상청 호우주의보 기준인 60 mm/3hr에 근접하게 산정된 것으로 나타난다. 또한 강우기준이 가장 높게 산정된 종로구에서는 2단계 기준이 약 85 mm/3hr로 기상청의 호우특보 기준(90 mm/3hr)와 근접하게 산정되었다. 이에 따라 본 연구에서 산정한 강우기준은 기상청 호우특보 기준과 근접하지만 자치구별 홍수취약도 및 피해특성에 따라 호우위험을 발령할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 실제 피해사례를 활용한 강우기준 적용성 평가

자치구별 산정된 강우기준의 적용성을 평가하기 위해 Fig. 5와 같이 3시간 지속시간의 피해 강우량을 강우기준에 따라 구분한 강우단계를 실제 홍수피해 사상의 피해단계와 비교하였다. 적용성 평가를 위해 선정한 호우사상은 2018년 8월 28일 사상과 2020년 8월 6일 사상이며, 노원구, 강북구, 도봉구 등 서울에 많은 도로침수 피해와 하천범람 피해가 발생한 사상이다.

4.2.1 2018년 8월 28일 호우사상을 활용한 적용성 평가

강우기준의 적용성을 평가하기 위해 선정한 첫 번째 호우

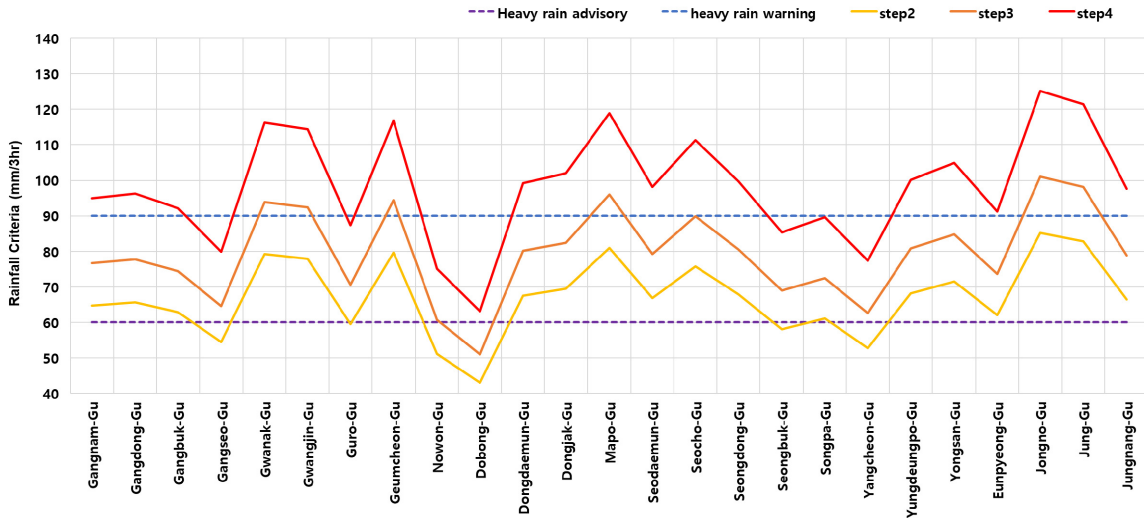


Fig. 4. Result of rainfall classification for 25 administrative districts in Seoul

Table 9. Result of rainfall classification

Administrative districts	Step 1 (mm/3hr)	Step 2 (mm/3hr)	Step 3 (mm/3hr)	Step 4 (mm/3hr)
Gangnam-Gu	5.00	64.73	76.76	95.01
Gangdong-Gu	5.00	65.59	77.78	96.27
Gangbuk-Gu	5.00	62.80	74.48	92.18
Gangseo-Gu	5.00	54.47	64.60	79.95
Gwanak-Gu	5.00	79.19	93.92	116.25
Gwangjin-Gu	5.00	77.97	92.46	114.44
Guro-Gu	5.00	59.49	70.55	87.32
Geumcheon-Gu	5.00	79.57	94.37	116.80
Nowon-Gu	5.00	51.16	60.67	75.10
Dobong-Gu	5.00	43.04	51.05	63.18
Dongdaemun-Gu	5.00	67.56	80.13	99.18
Dongjak-Gu	5.00	69.46	82.37	101.96
Mapo-Gu	5.00	80.99	96.05	118.88
Seodaemun-Gu	5.00	66.85	79.28	98.13
Seocho-Gu	5.00	75.82	89.92	111.30
Seongdong-Gu	5.00	67.98	80.62	99.78
Seongbuk-Gu	5.00	58.11	68.92	85.30
Songpa-Gu	5.00	61.08	72.43	89.65
Yangcheon-Gu	5.00	52.73	62.53	77.40
Yungdeungpo-Gu	5.00	68.18	80.86	100.09
Yongsan-Gu	5.00	71.51	84.81	104.96
Eunpyeong-Gu	5.00	62.12	73.67	91.18
Jongno-Gu	5.00	85.26	101.12	125.16
Jung-Gu	5.00	82.77	98.16	121.50
Jungnang-Gu	5.00	66.51	78.88	97.63

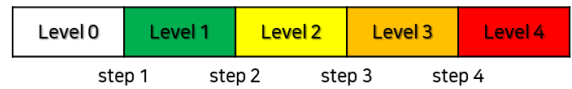


Fig. 5. Level of rainfall by classification

사상은 2018년 8월 28일 사상이다. 이 기간동안 서울에서는 3시간 최대 약 103 mm 강우가 발생하였으며, 기상청에서는 4일 전인 8월 25 일에 호우경보를 발령하였다. 이 사상에서는 Table 10과 같이 강남구, 강동구, 성북구, 도봉구 등 25개 자치구 중 12개 자치구에서 피해가 발생한 것으로 나타났다.

피해가 발생한 자치구의 3시간 최대 강우량을 강우기준에 적용하여 산정된 강우단계와 실제 피해현상에 따른 피해단계를 비교한 결과 침수피해가 발생하여 피해단계가 2단계인 강남구 및 강동구에서는 강우단계가 1단계로 실제 피해현상에 비해 낮게 구분되는 것으로 분석되었다. 하지만 건물 침수피해가 발생한 성북구와 은평구, 강서구에서는 각각 2단계와 3단계로 강우단계가 구분되었으며, 피해단계와 동일하거나 강우단계가 더 높다. 중랑천 범람으로 인해 산책로 침수 및 인명피해가 발생한 노원구와 도봉구에서는 강우단계가 4단계로 피해단계와 동일한 것으로 분석되었다.

4.2.2 2020년 8월 6일 호우사상을 활용한 적용성 평가

강우기준의 적용성 평가를 위해 선정한 두 번째 호우사상은 2020년 8월 6일에 발생한 호우사상으로 서울에서는 3시간 최대 약 80 mm의 강우가 발생하였다. 이 호우 기간 동안 기상청에서는 5일 전인 8월 1일에 호우주의보를 발령하여 2일에 호우경보로 대치하여 대응하였으며, 대체로 서울 북부지역

Table 10. Result of application for rainfall classification (Data : 2018.08.28.)

Damage District	Level of Rainfall	Damage Phenomenon (Level of Damage)
Gangnam-Gu	Level 1	• Inundation occurs (Level 2)
Gangdong-Gu	Level 1	• Inundation occurs (Level 2)
Dongdaemun-Gu	Level 1	• Inundation occurs (Level 2)
Mapo-Gu	Level 1	• Inundation occurs (Level 2)
Seodaemun-Gu	Level 1	• Inundation occurs (Level 2)
Yangcheon-Gu	Level 1	• Inundation occurs (Level 2)
Seongbuk-Gu	Level 2	• Inundation occurs (Level 2)
Eunpyeong-Gu	Level 2	• Inundation occurs (Level 2)
Gangseo-Gu	Level 3	• Inundation occurs (Level 2)
Gangbuk-Gu	Level 4	• Inundation occurs (Level 2)
Nowon-Gu	Level 4	• Inundation occurs, Streams overflow at Jungnang River (Level 4)
Dobong-Gu	Level 4	• Inundation occurs, Streams overflow at Jungnang River (Level 4)

Table 11. Result of application for rainfall classification (Data : 2020.08.06.)

Damage District	Level of Rainfall	Damage Phenomenon (Level of Damage)
Gwanak-Gu	Level 1	• Blackout (Level 1)
Gangbuk-Gu	Level 1	• Inundation occurs (Level 2)
Mapo-Gu	Level 1	• Inundation occurs (Level 2)
Seongbuk-Gu	Level 1	• Inundation occurs (Level 2)
Dobong-Gu	Level 3	• Inundation occurs, Streams overflow at Jungnang River (Level 4)

에 포함되는 자치구에서 홍수피해가 발생한 것으로 나타났다.

강우기준 적용성 평가 결과 Table 11와 같이 침수피해가 발생한 강북구, 마포구, 성북구 지역에서는 강우단계가 Level 1으로 피해단계에 비해 낮게 구분되는 것으로 분석되었다. 또한 중랑천 범람으로 인한 침수피해가 발생했던 도봉구에서는 강우단계가 Level 3으로 피해단계보다는 낮게 구분되었으나 다른 지역에 비해서는 현저하게 높게 구분되는 것으로 나타났다. 2020년 8월 6일 사상을 활용하여 적용성을 평가한 결과 대체로 실제 피해단계보다는 강우단계가 낮게 구분되는 것으로 분석되었다.

5. 결론

현재 각 지자체는 집중호우 발생 시 홍수피해 저감을 위해 기상청에서 전국적으로 동일한 기준으로 발령되는 호우특보에 따라 피해 대비, 대응을 실시하고 있다. 하지만 각 지역은 기후, 지형, 방재 등 지역특성과 홍수피해 규모 및 특성이 상이하다. 특히 서울특별시는 25개 자치구가 밀집되어 있지만 홍수취약성에 대한 자치구별 기후노출, 민감도, 적응도가 상이

한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 자치구별 홍수취약도를 고려하여 강우기준을 산정하는 방안에 대해 제시하고, 이를 실제 홍수피해 사례를 활용하여 적용성을 평가하였다.

자치구별 홍수취약도를 산정하기 위해 IPCC의 기후변화 취약성 모델을 기반으로 홍수취약성을 기후노출, 민감도, 적응도로 구분하였다. 각 평가인자 지수를 산정하기 위해 15개의 세부인자를 선정하였으며, 엔트로피 가중치 산정방법 및 유클리드 거리 산정방법을 활용하여 자치구별 홍수취약도를 산정하였다. 이처럼 엔트로피 방법 및 유클리드 방법을 활용하는 것은 참여자의 주관이 반영되는 기법 및 각 인자에 특정 가중치를 부여하는 기법에 비해 정량적 자료의 속성을 기반으로 객관적으로 가중치를 산정할 수 있다는 장점이 있다. 또한 본 연구에서 개발한 홍수취약도 산정방안은 선정된 세부인자의 타당성 및 수학적 무작위성으로 인해 왜곡된 결과를 도출할 가능성이 있지만, 전문가 설문조사에 대한 비용, 시간, 자료수집 등의 한계가 있는 경우 활용도가 높은 방안으로 판단된다.

자치구별 홍수취약도에 따라 강우기준을 산정한 결과 상대적으로 강우에 많이 노출되어 있지만 홍수피해에 대한 방재성능이 낮은 것으로 분석되어 홍수취약도가 가장 높게 산

정된 서울 북부지역(도봉구, 노원구 등)의 강우기준이 가장 낮게 산정되었다. 특히 중랑천 동부간선도로 및 산책로, 자전거 도로 등 침수피해가 자주 발생하는 도봉구에서는 4단계 강우기준이 기상청의 호우주의보 기준과 근접하는 것으로 분석되었으며, 이는 서울 북부지역의 지형특성으로 인해 맨홀 등 우수저감 시설 설치에 한계가 있기 때문에 이러한 지역 특성을 반영한 결과인 것으로 판단된다. 서울 중부 및 남부지역(종로구, 강남구 등)에서는 상대적으로 인구 및 재산이 밀집되어 있어 민감도가 높지만 재정자립도 및 우수저감 시설 비율이 높아 적용도가 높게 산정되어 상대적으로 강우기준이 높게 산정되었다. 강우기준 산정결과에 따라 서울 북부지역에서는 중부나 남부지역보다 낮은 강우기준으로 선제적으로 홍수에 대비 및 대응을 실시할 것으로 판단된다. 또한 자치구별 2단계 강우기준은 기상청의 호우주의보, 4단계 강우기준은 호우경보와 비슷하게 산정된 것으로 분석되었다. 이를 통해 전국적으로 동일한 기준으로 발령되는 기상청의 호우특보 기준을 각 지역 특성에 따라 산정된 강우기준으로 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

실제 홍수피해 사상을 활용하여 자치구별 산정된 강우기준의 적용성을 평가한 결과 중랑천 주변 침수 피해가 발생하는 도봉구 등 서울 북부지역에 대해서는 강우단계와 피해단계가 동일하지만 대체로 강우단계가 실제 피해단계에 비해 낮게 구분이 되는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 실제 홍수피해 이력을 기반으로 강우기준을 산정하였으나 피해가 강우 이외의 강풍, 홍수량, 인적요인 등에 의해 발생할 수 있다. 이는 수집된 홍수피해 자료의 피해 원인과 같은 상세한 분석 자료 확보 및 강우에 의한 직접적인 피해자료 수집이 가능한 경우 적용성이 더욱 향상된 강우기준을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발한 자치구별 강우기준 산정 기법은 지역별 특성 및 과거 피해이력을 기반으로 산정하였기 때문에 동일한 크기의 호우가 발생하는 경우 지역 상황에 따라 호우위험도를 발령하여 효율적인 홍수 피해 대응이 가능하고, 이에 따라 홍수 피해 저감대책을 수립할 수 있을 것으로 예상된다. 하지만 강우에 의한 홍수피해를 기반으로 강우기준 산정이 가능한 경우 적용성이 높은 강우기준을 산정할 수 있지만 현재 수집가능한 홍수피해 자료는 강우 이외의 강풍, 홍수량, 인적요인 등 다양한 요인으로 발생 향후에는 자치구별 강우기준 결과를 활용하여 기상예측자료의 적용성 검토 등을 통해 선제적으로 홍수피해에 대응방안을 수립하기 위한 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

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

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Choi, C.K., and Kim, K.T. (2020). "A study on the development of rainfall risk information considering local characteristics." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, No. 3, pp. 237-245.
- Choi, Y.J., and Yi, J.E. (2019). "Research on flood risk forecast method using weather ensemble prediction system in urban region." *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 52, No. 10, pp. 753-761.
- Dapeng, H., Renge, Z., Zhiguo, H., and Fei, M. (2012). "An assessment of multidimensional flood vulnerability at the provincial scale in China based on the DEA method." *Journal of Natural Hazard*, Vol. 64, pp. 1575-1586.
- Hiren, D., and James, M.E. (2017). "Characteristics of intense rainfall over Gujarat State (India) based on percentile classification." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 62, No. 12, pp. 2035-2048.
- Hwang, N.H., Park, H.S., and Chung, G.H. (2019). "Flood vulnerability analysis in Seoul, Korea." *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 52, No. 10, pp. 729-742.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001). *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Kim, Y.H., Choi, D.Y., Chang, D.E., Yoo, H.D., and Jin, G.B. (2011). "An improvement on the classification of special weather report for heavy rain considering the possibility of rainfall damage and the recent meteorological characteristics." *Journal of Atmosphere*, Vol. 21, No. 4, pp. 481-495.
- Kim, Y.K., Chung, E.S., and Lee, K.S. (2012). "Fuzzy TOPSIS approach to flood vulnerability assessment in Korea." *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 45, No. 9, pp. 901-913.
- Kim, Y.T., Park, M.H., and Kwon, H.H. (2020). "Spatio-temporal summer rainfall pattern in 2020 from a rainfall frequency perspective." *Journal of Korea Society of Disaster & Security*, Vol. 13, No. 4, pp. 93-104.
- Lee, S.H., Kang, J.E., Bae, H.J., and Yoon, D.K. (2015). "Vulnerability assessment of the air pollution using entropy weights:

- Focused on Ozone.” *Journal of The Korean Association of Regional Geographers*, Vol. 21, No. 4, pp. 751-763.
- 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.
- Shannon, C.E. (1948). “A mathematical theory of communication.” *The Bell System echnical Journal*, Vol. 27, No. 3, pp. 379-423.
- Shim, J.H., and Choi, S.Y. (2012). “Analysis of urban flood damage and strategies of Flood Response Strategies in future cities.” *Magazine of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 7, pp. 16-22.
- 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.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 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.