지역적 특성을 고려한 도시지역 홍수 취약성 평가: 한강권역을 대상으로

Analysis of the Local Characteristics of Flood Damage Vulnerability in an Urban Area: The Han River Basin

신희재* · 최영제** · 이재웅***

Shin, Heejae*, Choi, Youngje**, and Yi, Jaeeung***

Abstract

In urban areas, the damage caused by locally concentrated heavy rainfall has recently increased due to the congestion of population and assets, high impervious ratio, and increased utilization of underground space. The extent and types of damage differ depending on the characteristics of the area. Therefore, the vulnerability to and impact of floods should be assessed according to local characteristics, and flood mitigation alternatives should be developed accordingly. In this study, the urban areas of the Han river basin were classified by flood vulnerability and damage characteristics, and the relationship between flood vulnerability and flood damage was analyzed using historical flood damage data. First, the municipalities of the Han River basin were divided into urban and non-urban areas by multivariate statistical analysis using urban factors. Next, climate exposure, sensitivity, and adaptability were used to assess flood vulnerability for 56 local governments classified as urban areas. As a result of statistical analysis, they were divided into four clusters: regions with high flood vulnerability for all factors, regions with high flood sensitivity and low adaptability, regions with low sensitivity and high adaptability, and regions with low flood vulnerability for all factors. Finally, flood damage reduction measures were suggested according to the flood damage characteristics of each cluster.

Key words : Urban Flood, Flood Vulnerability, Principal Component Analysis, Cluster Analysis

요 지

도시지역은 인구 및 자산의 밀집화, 높은 불투수율, 지하 공간 활용 증대 등에 따라 최근 집중호우에 의한 피해가 급증하고 있다. 이러한 집중호우 피해는 지역 특성에 따라 규모 및 유형이 다르게 발생하기 때문에 지역 특성에 따른 홍수 영향 및 취약성에 대한 평가가 수행되어야 하며 이에 따른 지역별 적응 대책 수립이 요구된다. 본 연구에서는 한강권역의 도시지역을 대상으로 홍수 취약성 및 피해 특성에 따라 도시를 유형화하고 과거 홍수피해 자료를 활용하여 홍수 취약성과 홍수피해와의 관계를 분석하였다. 먼저 홍수 취약성을 분석하기에 앞서 한강권역 지자체를 대상으로 도시 관련 인자를 활용해 다변량 통계분석을 수행하여 도시 및 비도시지역으로 분류하였다. 이후 도시로 분류된 56개 지자체를 대상으로 지역별 홍수 취약성을 평가하기 위해 기후 노출, 민감도, 적응도 등 홍수 취약성 인자를 활용해 통계분석을 수행하였다. 그 결과 홍수 취약성 인자가 모두 높은 지역, 홍수 민감도는 높고 적응도는 낮은 지역, 민감도는 낮고 적응도가 높은 지역, 홍수 취약성 인자가 모두 낮은 지역 등 총 4개의 군집으로 구분되었다. 최종적으로 이러한 군집 별 특성을 반영하여 군집 별 홍수피해 특성에 따른 홍수피해 저감 대책을 제시하였다.

핵심용어 : 도시홍수, 홍수 취약성, 주성분분석, 군집분석

*정회원, 한국수자원조사기술원 금강조사실 연구원(E-mail: tsm1wo0938@naver.com)

Member, Researcher, Geum River Survey Division, Korea Institute of Hydrological Survey

**아주대학교 건설시스템공학과 박사과정

Ph.D Candidate, Dept. of Civil System 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, Dept. of Civil System Engineering, Ajou University

1. 서 론

최근 우리나라에서 발생하고 있는 강우는 과거에 비하여 지속시간은 짧아지고 총 강수량은 증가하는 등 집중호우의 발생이 증가하는 경향이 나타나고 있다(Jeon, 2009). 이에 따라 도로, 제방과 같은 시설물에 대한 피해뿐만 아니라 인명 등에 대한 홍수피해도 증가하고 있다(Park et al., 2005). 홍수피해는 강우특성뿐만 아니라 사회·시설적 특성, 토지이용, 환경적 요인 등 여러 특성에 영향을 받기 때문에 지역 특성에 따른 홍수 취약성에 대한 평가가 수행되어야 하며 그에 따른 지역별 특성을 고려한 적절한 홍수피해 저감 대책이 수립이 요구된다. 특히 우리나라는 인구의 약 90%가 도시지역에서 생활하고 있으며 이러한 도시지역은 높은 인구밀도, 자산밀집도 및 불투수율로 동일한 강우에 대해 다른 지역에 비해 홍수피해 규모가 크게 발생하는 경향을 보이고 있다(Kim et al., 2011). 따라서 본 연구에서는 통계학적 방법을 적용하여 한강권역 도시지역의 홍수 취약성을 파악하고 홍수 취약성 및 피해 특성에 따른 홍수 저감 계획을 제시하고자 하였다.

도시홍수피해가 빈번하게 발생하면서 국내에서도 홍수 취약성 평가에 대한 다수의 연구가 진행된 바 있다. Park et al. (2010)은 지역별 홍수피해의 위험성을 평가하기 위해 홍수피해에 영향을 미치는 인자를 자연적, 사회적, 정책적, 시설적 요인으로 나누어 홍수피해지표(Flood Damage Index, FDI)를 산정하였다. 또한 지자체별 홍수발생빈도와 홍수피해액 상관관계를 분석하여 지자체별 홍수피해를 유형화한 연구(Park et al., 2009), 기반시설의 홍수 취약성을 평가하기 위하여 기후노출, 민감도, 적응능력 3가지 지표와 기후변화 시나리오를 활용해 현재뿐만 아니라 미래에 대한 취약성을 분석한 연구(Han et al., 2012) 등이 진행되었다. Lee et al. (2013)은 연 최대강수량과 과거 홍수피해의 관계 분석을 통해 홍수피해 특성을 평가한 연구를 진행하였으며 Kim et al. (2018)은 홍수 취약성을 정량적으로 평가할 수 있는 홍수위험지수를 여러 모형을 통해 분석하고 이에 따른 홍수피해 유형별 적합한 홍수위험 지수 산정방법을 제시하는 연구를 진행하였다. 또한 지역의 특성을 이용하여 통계학적 분석에 적용한 연구로는 Shim et al. (2012)이 취약성을 사회·경제적, 지형적, 토지이용특성을 이용하여 분석하고 K-means 군집분석을 활용하여 수도권 도시를 유형화한 연구가 있었다. 국외에서는 지역별 홍수 취약성을 사회적, 경제적, 환경적 요인으로 나누어 취약지역을 분석하는 연구(Balica et al., 2009)와 도시 지역의 홍수 취약성을 평가하기 위해 홍수 취약성 지수(Flood Vulnerability Index, FVI)를 제시(Nasiri and Shahmohammadi-Kalalagh, 2013)한 연구가 진행된 바 있다. 기존 연구들은 주로 인문·사회, 환경적 요인을 활용하여 홍수위험도를 제시하거나 강우사상 및 빈도 별 홍수피해의 상관관계를 분석하는 연구가 주로 이루어지고 있어 홍수피해에 영향을 미치는 도시 특성을 파악하고 도시 유형별 홍수 저감 계획을 제안하는

연구는 부족한 실정이다. 본 연구는 기존 연구와 달리 홍수 취약성에 따라 지자체를 유형화하고 분류된 도시 유형별 홍수피해 저감 대책을 제시하였다.

2. 연구방법

2.1 홍수 취약성의 평가요소

취약성(Vulnerability) 개념은 기후변화, 재난위험관리 등 많은 분야에서 활용되고 있으며 그에 대한 개념 및 정의가 다양하다(UNDP, 2005). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)는 취약성을 기후 변동성이나 극한의 기상 현상을 포함하는 기후변화의 악영향을 어떤 시스템이 받아들일 수 없는지에 대한 정도 또는 대처할 수 없는 정도로 정의하고 있다(IPCC, 2001; Moss et al., 2001). 즉 취약성은 기후에 대한 시스템의 노출과 이러한 스트레스의 민감도, 적응능력의 함수로 나타낼 수 있다. 노출(Climate exposure)은 시스템이 기후 인자에 노출되는 정도를 나타내며 본 연구에서는 기후 노출로 일 최대강수량, 3시간 최대 강수량 등과 같은 기상 인자를 활용하였다. 민감도(Sensitivity)는 기후변화나 극한의 사상과 같은 외부적인 스트레스에 의해 시스템이 받는 영향의 정도이며 부정적인 영향과 긍정적인 영향을 모두 포함하고 있다. 본 연구에서는 불투수율, 평균경사, 인구밀도 등을 활용하여 각 지자체 별 홍수에 의해 받는 영향을 분석하였다. 적응도(Adaptability)는 기후변화에 의한 영향에 대해 지자체가 적응할 수 있는 능력을 말하며 홍수에서의 적응도는 재정자립도, 우수관거 비율, 저류조 용량 등을 통해 나타내었다. 지자체 별 홍수피해를 정량적으로 평가하기 위해서 본 연구에서는 홍수피해액을 농촌(농경지, 비닐하우스 등) 및 도시(건물, 도로 등) 피해액을 구분지어 산정하였다. 각 피해액은 2010년부터 2016년까지의 재해 연보에서 발췌하였으며 연도별 피해액은 2016년을 기준으로 가치 환산하였다. 각 평가 요인별 변수는 Table 1과 같다.

Table 1. Explanatory Variables of Flood Vulnerability

Variable classification	Variables
Climate exposure	Maximum daily precipitation
	Maximum 3 hours precipitation
Sensitivity	Impervious ratio
	Mean slope
	Population density
	Vulnerable population ratio
	Officially assessed reference land price
	Basement house ratio
Adaptability	Financial independence rate
	Storm sewer ratio
	Rainwater detention tank capacity
	Stream channel improvement ratio
Flood damage characteristics	Urban flood damage
	Non-urban flood damage

2.2 다변량 통계분석

다변량 통계분석은 특정 종속변수를 분석할 때 한가지 독립변수만으로 해석이 불가능한 경우 두 개 이상의 독립변수를 고려하여 분석하는 통계분석으로 각 변수에 포함된 정보의 손실을 최소화하고 여러 변수들 간의 인과 및 상관관계를 분석하는 방법이다(Bilodeau and Brenner, 2008). 본 연구에서는 한강권역의 지자체를 도시 및 비도시로 분류하기 위한 도시특성과 홍수 취약성을 판별하기 위한 기후노출, 민감도, 적응도 인자의 차원을 줄이기 위해 주성분분석을 활용하였으며 주성분분석 결과를 활용하여 군집분석을 수행하여 한강권역 내 도시지역을 홍수 취약성에 따라 분류하였다.

2.2.1 주성분분석(Principal Component Analysis)

다변량 통계분석 기법 중 요인분석(Factor analysis)은 여러 변수 간의 상관관계를 파악하여 변수들이 가지고 있는 정보를 적은 수의 요인으로 축약하여 각 변수가 요인에 얼마나 영향을 받고 있는지를 나타내는 통계적 분석 방법이다. 예를 들어 Z 라는 관찰변수를 두 개의 잠재변수 F_1 과 F_2 로 구분한다면 각 변수 사이의 관계는 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다. 이 때 a_1 과 a_2 는 각 잠재요인의 요인계수이며, U 는 잔차(Residual)를 의미한다. 여기서 잔차란 추정된 종속변수 값과 실제 관찰된 값의 차이를 의미한다. 요인분석은 이 잔차의 값을 0으로 보는 주성분분석과 0이 아닌값으로 보는 공통요인분석 방법으로 구분된다(Bae, 2004).

$$Z = a_1 F_1 + a_2 F_2 + U \quad (1)$$

이 중 주성분분석은 Fig. 1과 같이 두 개 이상의 변수들 사이의 분산-공분산 관계를 이용하여 몇 개의 요인으로 분류하고 전체 변동의 대부분을 설명하고자 하는 방법이다(Abdi and Williams, 2010). 이 방법은 차원을 감소시켜 자료의 해석을 용이하게 만들지만 여러 관찰변수에 내포된 모든 정보가 몇 개의 주성분에 포함되어 있지 않기 때문에 정보의 상실이 발생하게 된다. 따라서 주성분분석 수행 시 관찰변수

Fig. 1. Principal Component Analysis

들의 정보를 최대한 포함하고 있는 주성분을 도출하는 것이 중요하다(Kim and Mueller, 1978; Wold et al., 1987; Child, 1990). 본 연구에서는 요인분석 기법 중 주성분분석을 활용하여 도시특성 및 홍수 취약성에 따른 도시 분류에 사용된 변수들의 공통적인 특성 및 잠재요인을 도출하였다.

2.2.2 군집분석(Cluster Analysis)

군집분석은 여러 객체에 대하여 객체들 사이의 거리 또는 유사성에 따라 몇 개의 군집으로 분류하는 통계적 기법이다. 군집분석의 기본 원리는 객체들의 여러 특성을 이용하여 객체 간의 유사성 거리를 산출하고 유사성 거리가 가까운 객체들을 군집화하는 것이다. 따라서 군집분석을 활용하기 위해서는 객체 비교에 필요한 변수의 선정, 유사성 거리의 측정, 군집화 방법의 선정 등이 중요하다(Edwards and Cavalli-Sforza, 1965; Anderberg, 2014). 군집분석은 계층적(Hierarchical) 군집분석과 비계층적(Non-hierarchical) 군집분석이 있으며 본 연구에서는 초기 군집의 수 또는 반경을 미리 정하고 객체들을 군집화하는 비계층적 군집분석 중 K-평균 군집분석(K-means cluster method)을 활용하였다. K-평균 군집분석은 다량의 데이터를 활용하여 군집화할 경우 유용하지만 초기 군집 수의 결정이 주관적이기 때문에 적절한 군집 수를 선정하는 것이 매우 중요하다. 따라서 군집 수를 결정함에 있어 군집 수를 변경하면서 도출된 결과를 비교하는 분석이 요구된다(Kanungo et al., 2002).

3. 도시 관련 인자를 활용한 한강권역의 도시·비도시 분류

본 연구에서는 한강권역에 위치한 도시지역의 홍수 취약성에 대한 분석을 수행하기 위해 우선 도시관련 인자들을 활용하여 한강권역 지자체를 도시 지자체와 비도시 지자체로 분류하였다. 이 때 한강권역 내 총 90개의 기초지자체 중 해안을 접하고 있는 지자체의 경우 조위 등 해안과 관련된 요소가 홍수피해에 영향을 미칠 것으로 판단됨에 16개의 해안지역을 제외한 72개의 지역을 대상으로 도시 및 비도시 분류를 수행하였다.

3.1 주성분분석을 이용한 도시 특성인자 분류

주성분분석을 수행하기 위해 활용한 도시 관련 인자로 사회·시설적 지표, 경제적 지표, 환경적 지표로 나누어 총 14개 설명변수를 사용하였다. 이때 설명변수 간의 상관성을 파악하기 위하여 요인분석방법 중 하나인 베리맥스(Varimax) 요인회전을 적용하였다. 이를 위해 우선 Z-스코어 방법을 활용해 각 설명변수를 표준화하였으며 요인분석의 결과는 Table 2와 같다. Table 2에서 공통성(Communality)은 요인분석에서 추출된 주성분에 의해 각각 설명변수가 가지고 있는 정보를 얼마나 표현할 수 있는가를 나타내는 값으로

Table 2. Result of Factor Analysis Using Factors about Urbanization

Variables	Initial value	Communality
Water supply and sewer service ratio	1.000	0.829
Economically active population ratio	1.000	0.889
Number of elementary students per class	1.000	0.921
Total number of businesses	1.000	0.657
Financial independence rate	1.000	0.900
Number of healthcare workers per thousand people	1.000	0.769
Local tax levy per capita	1.000	0.768
Officially assessed reference land price	1.000	0.914
Population density	1.000	0.908
Impervious ratio	1.000	0.879
Aging population ratio	1.000	0.898
Number of civil servants per thousand people	1.000	0.869
Number of businesses related to agriculture	1.000	0.487
Cultivated land ratio	1.000	0.573

공통성이 0.4보다 작으면 일반적으로 추출된 주성분에 의해 설명변수를 설명할 수 없다고 판단한다(Leimeister, 2010). Table 2에서 14개의 설명변수가 가지는 공통성을 분석한 결과로 모든 설명변수에 대하여 공통성이 0.4가 넘는 것으로 확인되어 적절한 변수가 선정되었다고 판단하였다.

주성분분석에서는 주성분의 수를 어떻게 하는가에 따라 분석 결과에 큰 영향을 미치게 된다. 주성분의 수는 고유값(Eigenvalue)을 기준으로 결정하거나 스크리 검정(Scree test), 분산의 비율 등을 통해 결정할 수 있다. 여기서 고유값은

요인분석에 의해 추출된 요인들이 전체 변수에 대하여 정보를 포함하고 있는지를 나타낸다. 본 연구에서는 고유값 1.0을 기준으로 주성분의 수를 결정하였으며 고유값이 1.0이 넘는 주성분의 수는 3개로 나타났다. 이때 3개 주성분의 누적된 분산의 비율은 전체의 80.42%인 것으로 분석되었다. 주성분 분석을 통해 추출된 제 1주성분의 분산은 51.31%이며 제 2, 3주성분의 분산은 각각 15.22%, 13.89%로 산정되었다. 각 설명변수 별 주성분에 대한 요인 적재값(Factor loading)은 Table 3과 같다. 요인 적재값은 주성분분석을 통해 추출된

Table 3. Result of Principal Components Analysis Using Factors about Urbanization

Variable Name	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Water supply and sewer service ratio	0.801	0.407	0.145
Economically active population ratio	0.837	0.413	0.135
Number of elementary students per class	0.950	0.063	0.121
Total number of businesses	0.604	0.260	0.473
Financial independence rate	0.649	-0.249	0.645
Number of health workers per thousand people	0.038	0.364	0.797
Local tax levy per capita	-0.013	-0.099	0.871
Officially assessed reference land price	0.269	0.621	0.676
Population density	0.392	0.868	0.013
Impervious ratio	0.451	0.784	0.246
Aging population ratio	-0.942	-0.095	-0.049
Number of civil servants per thousand people	-0.906	-0.216	0.035
Number of agricultural-related businesses	-0.343	-0.600	-0.094
Cultivated land ratio	0.139	-0.744	0.003
Eigenvalue	7.183	2.131	1.945
Variance (%)	51.305	15.223	13.894
Cumulative Variance (%)	51.305	66.528	80.422

주성분과 설명변수 간의 상관관계를 나타내는 값으로 요인 적재값이 높을수록 주성분과 설명변수가 밀접한 관계를 가지는 것을 나타낸다.

주성분별 특성을 보면 제 1주성분의 경우 상하수도 보급률, 경제활동인구비율, 학급 당 초등학생 수 등의 설명변수에서 요인 적재값이 0.6을 넘는 것을 확인할 수 있다. 제 2주성분은 인구 밀도, 시가지화 비율 등 도시지역에서의 인구밀도와 관련된 인자에서 높은 적재값을 보이고 있는 반면 농업 관련 사업체 수, 전·답 면적 비율 등 농업 관련 인자와는 음의 관계를 가진다. 제 3주성분은 인구 천 명당 의료 종사자 수, 1인당 지방세 징수액, 표준 공시지가 등 경제적 지표에 관련된 인자에서 높은 요인 적재값을 가지고 있다.

3.2 도시 특성인자를 활용한 군집분석

주성분분석을 통해 산정된 3가지 주성분을 이용하여 K-평균 군집분석을 수행하고, 요인점수를 산정하였다. 요인점수는 주성분분석을 통해 추출된 주성분이 각 변수에 대하여 얼마나 영향을 미치는가를 나타내는 점수로 주성분과 각 설명변수와의 상관관계를 나타낸다. 분석 결과 해안지역 16개 지자체를 제외한 72개 지자체 중 56개 지자체를 도시지역으로 판단하였으며 각 군집에 대한 상세내용은 다음과 같다. 우선 군집 1에 포함된 가평군, 괴산군, 단양군 등이 포함된 군집으로서 모든 도시 관련 인자와 음의 관계를 가지고 있어 비도시지역으로 판단하고 이후 도시지역의 홍수 취약성 평가에서 제외하였다. 군집 2는 표준 공시지가, 인구밀도, 시가지화 비율과 밀접한 관련이 있는 제 2주성분에 높은 영향을 받으며 강동구, 강북구, 강서구, 관악구 등 서울 주거지역이 포함되는 것으로 확인되었다. 군집 3은 제 1주성분과 제 2주성분이 주로 영향을 받으며 고양시, 과천시, 광명시 등 경기 주거지역과 춘천시, 원주시, 충주시 등 강원도 및 충청도의 주요 도시가 포함되어 있다. 마지막으

Fig. 2. Result of Clustering Analysis Using Urban Factors

Table 4. Result of Clustering Analysis for Classification of Urban and Non-urban Regions

Clusters	Number of regions	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Cluster 1	16	-1.5608	-0.3937	-0.2875
Cluster 2	23	0.3011	1.2154	-0.3375
Cluster 3	30	0.6372	-0.8046	0.0153
Cluster 4	3	-0.3563	0.8274	3.9682

로 군집 4는 서울 상업 지역인 강남구, 종로구, 중구 등 3개 지자체가 포함되며 주로 제 2주성분 및 제 3주성분과 높은 상관관계를 가지고 있다. 본 연구에서는 군집 2, 3, 4에 포함되는 56개 지자체를 대상으로 홍수 취약성 인자를 활용하여 홍수피해 특성 파악을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 2 및 Table 4와 같다.

4. 홍수 취약성에 따른 도시 군집 분류

도시와 관련된 인자들을 활용하여 도시지역으로 분류된 한강권역 내 56개 도시 지자체를 대상으로 홍수 취약성 인자를 활용하여 군집분석을 수행하였다. 우선 인자들에 대한 주성분분석을 실시하였으며 주성분분석을 통해 도출된 주성분을 활용하여 도시지역을 총 4개의 도시지역으로 분류하였다.

4.1 홍수 취약성 인자를 고려한 주성분분석

군집분석을 통해 분류된 56개 도시지역을 대상으로 홍수 취약성에 따른 분류를 하기 앞서 홍수 취약성 설명변수를 활용한 주성분분석을 수행하였다. 홍수 취약성 변수는 기후 노출(일 최대강수량, 3시간 최대강수량), 민감도 변수(불투수율, 평균 경사 등), 적응도 변수(재정자립도, 저류조 용량 등)로 나누어 총 12개를 활용하였다. 설명변수는 Z-스코어 방법에 의해 표준화를 수행하였으며 요인의 수는 최소 고유값(1.0)을 기준으로 결정하였다. 고유값이 1.0이 넘는 3개 인자에 대한 누적 분산은 68.39%이며 홍수 취약성 변수별 주성분에 대한 요인 적재값은 다음 Table 5와 같다.

홍수 취약성 변수를 활용한 주성분분석 결과 제 1주성분은 불투수율, 인구밀도 등 도시특성과 관련된 인자에 지배적인 특성을 가지고 있으며 하천 개수율, 저류조 용량 등 방재성능과 관련된 인자에서 높은 상관관계를 가지고 있다. 반면 취약인구, 평균경사에 대하여 반비례하는 특성이 있다. 제 2주성분의 경우 일 최대강수량, 3시간 최대강수량 등 기상요인과 관련된 인자에서 높은 요인 적재값이 나타나며 제 3주성분의 경우 재정자립도, 우수관거 비율 등 홍수피해의 저감 능력에 관련된 인자에서 높은 상관관계를 보이는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 주성분분석을 통해 산정된

Table 5. Result of Principal Components Analysis Using Factors about Flood Vulnerability

Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Maximum daily precipitation	0.148	0.790	0.127
Maximum 3 hours precipitation	0.706	0.572	-0.105
Impervious ratio	0.923	0.067	-0.036
Mean slope	-0.745	0.179	-0.180
Population density	0.918	0.105	-0.271
Vulnerable population ratio	-0.760	0.242	-0.219
Officially assessed reference land price	0.651	0.456	0.334
Basement house ratio	0.697	0.234	-0.071
Financial independence rate	-0.105	0.066	0.947
Storm sewer ratio	0.133	-0.629	0.513
Rainwater detention tank capacity	0.523	0.188	-0.035
Steram channel improvement ratio	0.614	0.232	-0.018
Eigenvalue	5.213	1.722	1.272
Variance (%)	43.445	14.347	10.598
Cumulative variance (%)	43.445	57.792	68.390

3개의 요인을 활용하여 홍수 취약성에 따른 도시지역의 군집분석을 수행하였다.

4.2 홍수 취약성에 따른 군집분석 수행

홍수 취약성 변수를 활용하여 주성분분석을 수행한 결과 3개의 요인이 추출되었으며 3개 요인에 따른 지역별 요인점수를 활용하여 K-평균 군집분석을 수행하였다. 군집분석을 수행한 결과 4개의 군집으로 산정되었으며 군집 별 요인점수는 Table 6과 같고, 각 군집 별 지자체는 Table 7 및 Fig. 3과 같다.

Table 6. Result of Clustering Analysis for Classification by Flood Vulnerability

Clusters	Number of regions	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Cluster 1	10	0.557	0.731	1.001
Cluster 2	19	0.822	0.190	-0.870
Cluster 3	11	0.065	-1.218	0.921
Cluster 4	16	-1.369	0.155	-0.226

Table 7. Result of Clustering Analysis Using Flood Vulnerability Factors

Cluster	Regions			
Cluster 1 (10)	Gangnam-gu	Guri-si	Gwangmyeong-si	Jongno-gu
	Jung-gu	Mapo-gu	Seocho-gu	Songpa-gu
	Yeongdeungpo-gu	Yongsan-gu		
Cluster 2 (19)	Bupyeong-gu	Dobong-gu	Dongdaemun-gu	Dongjak-gu
	Eunpyeong-gu	Gangbuk-gu	Gangdong-gu	Gangseo-gu
	Geumcheon-gu	Guro-gu	Gwanak-gu	Gwangjin-gu
	Jungnang-gu	Nam-gu	Nowon-gu	Seodaemun-gu
	Seongbuk-gu	Seongdong-gu	Yangcheon-gu	
Cluster 3 (11)	Anyang-si	Bucheon-si	Goyang-si	Gunpo-si
	Gwacheon-si	Gyeyang-gu	Namdong-gu	Osan-si
	Seongnam-si	Suwon-si	Uiwang-si	
Cluster 4 (16)	Anseong-si	Chuncheon-si	Chungju-si	Dongducheon-si
	Gimpo-si	Gwangju-si	Hanam-si	Icheon-si
	Jecheon-si	Namyangju-si	Paju-si	Uijeongbu-si
	Wonju-si	Yangju-si	Yeoju-si	Yongin-si

Fig. 3. Result of Clustering Analysis Using Flood Vulnerability Factors

군집 1은 도시적 특성 및 경제적 지표에서 높은 요인점수를 나타내는 마포구, 강남구, 광명시, 구리시 등 10개 지자체가 포함되었다. 군집 1에 포함된 지자체들은 홍수 취약성 인자에 의해 선정된 3개의 주성분에 대하여 모두 0.5 이상의 요인점수를 가지며 특히 홍수피해를 저감시킬 수 있는 능력을 나타내는 적응도와 높은 상관관계를 가지는 제 3주성분에 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 군집 2에 포함된 지자체는 인구밀도와 불투수율이 지배적인 특성을 가지며 강동구, 강북구, 노원구, 부평구, 남구 등 서울, 인천지역의 주거지역이 포함되는 것을 확인할 수 있다. 군집 1과 비교하였을 때 적응도와 관련된 제 3주성분에 대하여 음의 관계를 나타내며 같은 규모의 홍수가 발생하였을 때 군집 1보다 홍수에 대한 취약성이 더 크다고 판단된다. 군집 3은 계양구, 고양시, 과천시, 군포시 등 인천, 경기지역이 포함되었으며 강우와 관련된 인자인 제 2주성분과 반비례하며 재정자립도 및 우수관거 비율 등 적응도에 관련된 인자가 높게 선정되어 4개의 군집 중 홍수 취약성이 가장 낮은 지역으로 판단된다. 마지막으로 군집 4의 경우 인구밀도, 불투수율 등 도시적 특성과 관련된 제 1주성분과 반비례하며 파주시, 여주시, 원주시, 춘천시 제천시 등 경기도 외곽지역, 강원도 및 충청도 지역이 포함되는 것을 확인할 수 있다.

5. 홍수피해 특성에 따른 도시 유형별 홍수 취약성 평가

홍수 취약성에 따라 분류된 4개 군집의 도시지역들의 홍수 특성을 파악하기 위해 기후노출, 민감도, 적응도, 홍수 피해 등 4가지 요소에 대해 취약성 지수를 산정하였다. 이후 각 군집에 포함된 지역들의 홍수 취약성을 분석하여 각 군집 별 홍수 특성을 파악하고 그 특성에 맞는 홍수피해

저감방안에 대한 분석을 실시하였다.

5.1 홍수 취약성 지수 산정

본 연구에서는 홍수 취약성 인자에 대하여 Z-스코어 방법을 적용하여 표준화된 지수를 활용해 도시 유형별 홍수 취약성을 평가하였다. 취약성을 평가하기 위한 인자는 기후 노출민감도, 적응도, 홍수피해액으로 나누어 산정하였으며 각각의 요인에 대하여 도시 유형별로 분석을 수행하였다. 각 홍수 취약성 요인별 지수(F_i)는 다음 Eq. (2)와 같다.

$$F_i = \frac{\sum_{j=1}^n Z_{ij}}{n} \quad (2)$$

F_i 는 홍수 취약성을 평가하기 위해 사용한 i 번째 지표의 표준화 값을 산술평균하여 산정된 인자이다. i 는 홍수 취약성 지표(기후 노출, 민감도, 적응도, 홍수피해), j 는 설명변수(일 최대강수량, 불투수율 등)를 말하며 Z_{ij} 는 지표 i 의 j 번째 변수의 표준화 값을 말한다.

5.2 홍수 취약성 평가

5.2.1 기후 노출

각 도시 유형별 기후 노출에 대하여 취약성 지수를 산정하였다. 기후 노출에 대한 취약성 지수가 높을수록 일 최대강수량, 3시간 최대강수량 등 홍수피해와 관련된 강우 발생의 위험성이 높다는 것을 의미한다. 분석 결과 동두천, 양주시 등 경기 북부 지역에서 높은 지수 값이 산정된 반면 안성시, 광주시, 충주시 등 경기 남부, 충청도 지역에서 낮은 지수 값이 산정되었다. 기후 노출의 취약성에 대하여 도시 유형별로는 서울지역이 다수 포함되어있는 군집 1과 군집 2에서 높은 지수 값이 나타났으며 경기 남부 및 인천 지역이 포함되어있는 군집 3이 가장 낮은 기후 노출의 취약성이 나타났다(Fig. 4(a)).

5.2.2 민감도

민감도에 대한 취약성은 토지이용, 인구 특성 등을 활용하여 산정하였으며 민감도에 대한 취약성 지수가 높을수록 동일 강우에 대해서도 더 큰 홍수피해가 발생할 수 있다는 것을 나타낸다. 민감도 지수는 서울시 중구, 동작구 등 표준공시지가 및 인구밀도가 높은 지역에서 높은 지수 값이 산정되었으며 인천시 계양구, 경기도 이천시 등에서 낮은 결과를 보이고 있다. 도시 유형별 민감도 지수를 분석하면 인구밀도 및 불투수율 등이 높은 서울의 주거지역이 다수 포함되어있는 군집 2에서 높은 민감도 지수가 산정되었으며 군집 1, 군집 2에 비하여 인구밀도 및 불투수율 등 도시적 특성이 낮은 군집 3과 군집 4에서 낮은 민감도 지수가 산정되었다(Fig. 4(b)).

Fig. 4. Result of Flood Vulnerability Index

5.2.3 적응도

적응도는 홍수가 발생하였을 때 지자체가 기상현상을 감당할 수 있는 정도나 피해를 저감시킬 수 있는 능력을 나타내며 본 연구에서는 홍수피해를 저감시킬 수 있는 우수관거 비율, 저류조 용량 등 시설적 인프라와 재정적 능력 등을 활용하여 각 지자체의 적응도를 평가하였다. 각 지자체별 적응도를 평가한 결과 우수관거 비율, 저류조 용량 등 홍수 저감 시설이 잘 구비되어 있는 수원시, 중랑구, 중구 순으로 높은 지수를 나타내었으며 피해를 저감시킬 수 있는 경제적 능력 측면에서 서초구, 강남구 등에서 높은 결과를 보였다. 도시 유형별 적응도는 수원시, 고양시 등 홍수 저감 시설이 잘 갖춰진 지자체가 다수 포함되어있는 군집 3에서 가장 높은 적응도 지수가 산정되었으며 적응도를 구성하는 모든 인자(재정자립도, 우수관거 비율, 하천 개수율 등)에서 낮은 표준화 점수를 가진 군집 4에서 가장 낮은 적응도 지수를 나타내는 유형으로 나타났다(Fig. 4(c)).

5.2.4 홍수피해 특성

본 연구에서는 각 지자체 별 홍수피해의 특성을 평가하기 위해 도시피해액(건물, 도로 등)과 농촌 피해액(농경지, 가축, 비닐하우스)을 활용하였으며 앞서 산정한 도시 유형별 홍수 취약성 평가와 비교를 수행하였다. 홍수 취약성 지수들과 홍수피해 지수를 분석한 결과 홍수피해 지수는 대체로 적응도 지수에 지배적인 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 적응도 지수가 낮게 산정된 파주시, 춘천시 등이 포함되어있는 군집 4에 대해 높은 홍수피해 지수가 산정되었으며 기후노출 및 노출도가 낮고 적응도 지수가 높은 군집 3에서 가장 낮은 홍수피해 지수가 산정되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 기후노출 및 민감도가 낮은 지역이라도 적응도 지수에서도 낮게 산정되면 같은 사상의 홍수가 발생하더라도 홍수피해의 규모가 크게 발생시킬 수 있다고 판단된다 (Fig. 4(d)).

5.3 홍수피해를 고려한 도시 유형별 분석

본 연구에서는 홍수 취약성에 따라 한강권역의 도시지역의 군집분석을 수행하고 군집화된 도시 유형별 홍수 취약성-홍수피해의 관계분석을 수행하였다. 각 도시 유형별 홍수 취약성에 따른 홍수피해 특성 및 홍수피해 저감 대책은 다음과 같다.

5.3.1 군집 1의 홍수피해 특성 분석

군집 1의 경우 강남구, 마포구 등 서울 지자체가 다수 포함되었으며 높은 인구밀도, 불투수율 등으로 인해 민감도 및 기후 노출이 높게 산정되어 있다. 하지만 높은 재정자립도와 우수관거나 저류조 등 홍수 저감 시설이 비교적 잘 구성되어 있어 적응도 지수가 높게 산정되었다. 다른 도시 유형과 비교하였을 때 기후노출과 민감도 지수가 비슷하게 산정된 군집 2에 비해 홍수피해액이 적게 산정되는 것을 확인하였다. 군집 1과 같은 지역은 대체로 홍수피해가 발생하지 않지만 상습적으로 침수 피해가 발생하는 강남구, 서초구 등 지자체에서는 우수관거의 설계 빈도를 상향 조정하고 우수 배제 시설의 통수능 확보가 필요하다고 판단된다.

5.3.2 군집 2의 홍수피해 특성 분석

강동구, 강북구 등 서울 주거지역이 다수 포함되어 있는 군집 2는 군집 1과 마찬가지로 높은 불투수율과 인구밀도로 인해 민감도가 높게 산정되어 있지만 홍수피해를 저감시킬 수 있는 방제시설이 상대적으로 적어 공공시설물 및 사회기반 시설물에 대한 안정성 확보가 필요하다고 판단된다. 특히 군집 2의 경우 지하구조물이 다수 존재하고 있어 지하층에 대한 침수를 대비하기 위한 하수관거 및 빗물 펌프장 등의 시설 용량을 확대가 필요하며 노후화된 건물 및 시설에 대한 재정비 및 안전 기준을 강화하여 도시홍수의 피해를 최소화하여야 한다.

5.3.3 군집 3의 홍수피해 특성 분석

군집 3은 계양구, 고양시 등 인천 경기 주거지역이 다수 포함되었으며 제방, 하수관거 등 인공구조물에 의한 홍수피해 저감 능력이 높고 기후 노출에 대한 영향이 작아 홍수에 대한 취약성이 낮은 지역이다. 이러한 지역은 기후변화로 인해 발생 가능한 극한 사상의 홍수에 대비하여야 하며 수문 및 기상 예측 시나리오를 활용하여 상향된 설계빈도 및 하천 정비 계획을 수립하여 공공시설 및 상습 침수 지역에 대한 집중적인 홍수피해 관리를 수행하는 것이 효율적이라 판단된다.

5.3.4 군집 4의 홍수피해 특성 분석

군집 4의 경우 여주시, 이천시 등이 포함되었으며 기후 노출에 대한 영향은 작지만 홍수피해를 저감시킬 수 있는 능력이 낮아 홍수의 잠재적인 피해 발생이 예상되는 지역이

다. 군집 4에 포함된 지자체들은 대부분 경제적 능력이 낮아 홍수피해를 저감시킬 수 있는 제도적 역량 측면에서 부족하며 홍수 대응에 대한 시설물이 미흡한 실정이며 이러한 경향은 군집 4에 포함되어 있는 여주시, 춘천시 등이 가장 높은 홍수피해가 발생한 것을 통해 확인할 수 있다. 특히 군집 4에 포함된 지자체들은 농촌피해가 다수 발생하고 있어 홍수보험제도와 같은 경제적 보상의 보완이 필요하다. 또한 재정자립도와 같은 경제적 능력이 높지 않은 지자체들이 대다수가 포함되어 있어 저감 시설의 추가적인 설치 등과 같은 구조적 대안보다 홍수 발생 예상 지역에 대한 방제지도 및 홍수 예·경보 시스템 등 비구조적 대안을 통한 정책적 방지 대책 수립이 효율적이라 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 한강권역 도시지역을 대상으로 지자체별 홍수 취약성에 따른 유형화를 수행하였으며 도시군집 별 홍수피해 특성 분석 및 홍수피해 저감 대책 방안을 제시하였다. 먼저 한강권역 지자체는 도시 관련 인자(사회·시설적, 경제적, 환경적 지표)를 통해 군집분석을 수행하여 도시와 비도시로 분류하였다. 군집분석 결과 한강권역 지자체는 4개의 군집으로 분류되었으며 모든 도시 관련 인자에 대해 낮은 요인점수를 획득한 16개 지자체를 제외한 56개 지자체를 활용하여 홍수 취약성을 분석하였다. 홍수 취약성은 기후 노출, 민감도, 적응도 인자로 나누어 지자체를 대상으로 주성분분석 및 군집분석을 수행하였다. 주성분분석 결과 고유값이 1.0 이상인 주성분은 3개로 산정되었으며 제 1주성분은 민감도 관련 인자(불투수율, 인구밀도)와 높은 상관관계를 가졌다. 제 2주성분의 경우 기후 노출(일 최대강수량, 3시간 최대강수량)과 관련된 인자가 포함되었으며 제 3주성분은 적응도(재정자립도, 우수관거 비율 등)와 관련된 인자들이 높은 상관관계를 보이는 것을 확인하였다. 각 군집 별 홍수피해는 도시피해액(건물, 도로, 상하수도 피해액)과 농촌 피해액(농경지, 가축, 비닐하우스)으로 나누어 평가하였으며 이를 활용해 각 도시군집 별 홍수피해 특성에 따른 홍수피해 저감 대책을 제시하였다.

각 군집 별 홍수 취약성과 홍수피해 특성을 분석한 결과 군집 1의 경우 홍수 취약성 인자(민감도, 기후 노출, 적응도) 모두에서 높은 요인 적재값을 가지는 것을 확인할 수 있으며 주로 재정자립도 및 불투수율이 높은 서울 지자체가 다수 포함되었다. 군집 1은 기후 노출과 민감도가 높아 적응도에 따라 홍수피해의 차이가 발생하는 경향이 있어 강남구, 서초구 등 상습적으로 침수가 발생하는 지역에 대해서 우수배제 시설의 설계빈도 조정 및 통수능 확보가 필요하다고 판단된다. 군집 2는 인구밀도 및 불투수율이 높아 민감도가 높게 산정되었으나 군집 1에 비해 적응도 관련 인자가 낮게 산정되어 홍수 취약성이 크다고 판단된다. 군집 2의 홍수피해는

주로 건물피해가 다수 발생하였으며 높은 불투수율 및 지하 구조물의 침수를 대비하기 위한 하수관거 및 빗물펌프장의 시설 용량 확대가 필요하다고 판단된다. 군집 3의 경우 민감도가 낮게 산정되었으며 홍수피해 저감 시설이 잘 구비되어 있어 홍수피해가 가장 적게 발생한 유형이다. 이러한 지역은 기후변화에 의한 설계빈도 이상의 집중호우 피해에 대비하여야 하며 고위험 지주의 집중적인 홍수피해 관리를 수행하는 것이 효과적이다. 군집 4의 경우 인구밀도, 불투수율 등 도시적 특성을 나타내는 인자와 홍수피해 저감 능력이 낮아 민감도 및 적응도가 낮게 산정되었다. 이러한 지역은 다른 군집에 포함된 지역들보다 더 작은 강우에 대해서도 홍수피해가 발생할 수 있으며 홍수피해가 도시와 관련된 피해를 포함하여 농촌피해도 다수 발생하는 경향이 나타났다. 또한 재정자립도가 낮은 지자체가 다수로 제도적 역량 제한적이어서 홍수피해 저감 시설 확충과 같은 구조적 대안이 제한되며 실시간 상황 전파 체계 수립과 같은 비구조적 대안이 필요하다고 판단된다.

본 연구는 한강권역 도시지역을 대상으로 홍수 취약성에 따라 지자체를 유형화하고 분류된 도시 유형 별 과거 홍수피해에 따른 홍수피해 저감 대책을 제시하였다. 도시홍수 취약성에 따른 도시 유형별 홍수피해 특성을 평가한 결과는 홍수피해의 자료가 충분하지 않거나 발생하지 않은 지역에 대해서 홍수 취약성에 따른 도시홍수 방어 대책 제시에 대한 방안으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물관리연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2019002640001).

References

- Abdi, H., and Williams, L.J. (2010). Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, Vol. 2, No. 4, pp. 433-459.
- Anderberg, M.R. (2014). *Cluster analysis for applications: Probability and mathematical statistics: a series of monographs and textbooks*. Series Vol. 19, New York, NY: Academic press.
- Bae, H.S. (2004). *Educational evaluation thesaurus*, Korean Society for Educational Evaluation. Seoul: Hakjisa.
- Balica, S.F., Douben, N., and wright, N.G. (2009). Flood vulnerability indices at varying spatial scales. *Water Science & Technology*, Vol. 60, No. 10, pp. 2571-2580.
- Bilodeau, M., and Brenner, D. (2008). *Theory of multivariate statistics*. Springer Science & Business Media.
- Child, D. (1990). *The essentials of factor analysis* (2nd ed.). New York, NY: Cassell Educational.
- Edwards, A.W., and Cavalli-Sforza, L.L. (1965). A method for cluster analysis. *Biometrics*, Vol. 21, No. 2, pp. 362-375.
- Nasiri, H., and Shahmohammadi-Kalalagh, S. (2013). Flood vulnerability index as a knowledge base for flood risk assessment in urban area. *Journal of Novel Applied Sciences*, Vol. 2, No. 8, pp. 266-269.
- Han, W.S., Sim, O.B., Lee, B.J., and Yoo, J.H. (2012). The proposal of evaluation method for local government infrastructure vulnerability relating to climate change driven flood. *Climate Change Research*, Vol. 3, No. 1, pp. 25-37.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). *Climate change 2001: Impacts, adaptations and vulnerability*. Cambridge University Press, UK.
- Jeon, B.S. (2009). Hydrometeorological policy direction due to climate change, *Meteorological Technology & Policy*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-2.
- Kanungo, T., Mount, D.M., Netanyahu, N.S., Piatko, C.D., Silverman, R., and Wu, A.Y. (2002). An efficient k-means clustering algorithm: Analysis and implementation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, Vol. 24, No. 7, pp. 881-892.
- Kim, B.K., Jang, D.W., Zang, N., and Yang, D.M. (2011). The deduction of urban flood risk factor considering climate change. *Crisisonimy*, Vol. 7, No. 1, pp. 125-142.
- Kim, J.O., and Mueller, C.W. (1978). *Factor analysis: Statistical methods and practical issues*. Series No. 14, Newbury Park, CA: Sage Publications.
- Kim, M.J., and Kim G.S. (2018). Analysis of the applicability of flood risk indices according to flood damage types. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 38, No. 1, pp. 29-39.
- Lee, M.W., Kim, T.W., and Moon, G.W. (2013). Assessment of flood damage vulnerability considering regional flood damage characteristics in South Korea. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 4, pp. 245-256.
- Leimeister, S. (2010). Theoretical and methodological foundations for classifying data. *IT Outsourcing Governance: Client types and their management strategies* (pp. 81-109). Germany: Springer Gabler.

- Moss, R.H., Brenkert, A.L., and Malone, E.L. (2001). *Vulnerability to climate change: A quantitative approach*. PNNL-SA-33642, U.S. Department of Energy.
- Park, T.S., Choi, M.H., Yeo, C.G., and Lee, S.O. (2009). Analysis of regional flood damage characteristics using relationship between flood frequency and damages. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 9, No. 5, pp. 87-92.
- Park, T.S., Kim, G.M., Yoon, Y.S., and Lee, S.B. (2005). *Analysis of flood damage characteristics and development of flood damage index*. KRIHS Report No. 2005-6, Korea Research Institute for Human Settlements.
- Park, T.S., Yeo, C.G., Choi, M.H., and Lee, S.O. (2010). Flood damage index regarding regional flood damage characteristics. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 4B, pp. 361-366.
- Shim, J.H., Kim, J.E., and Lee, S.H. (2012). Classification of cities in the metropolitan area based on natural hazard vulnerability. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 13, No. 11, pp. 5534-5541.
- United Nations Development Programme (UNDP). (2005). *Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policies and measures*. Cambridge University Press.
- Wold, S., Esbensen, K., and Geladi, P. (1987). Principal component analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Vol. 2, No. 1-3, pp. 37-52.

Received ■ July 25, 2019

Revised ■ July 26, 2019

Accepted ■ September 2, 2019