

서울시 침수피해의 자연·환경적 요인분석*

박수진** · 박지수***

Analyzing Environmental Factors Affecting Flood Damage in Seoul*

Soo Jin Park** · Jisoo Park***

요약 : 이 연구의 목적은 2010년부터 2014년까지의 서울시 침수피해에 영향을 미치는 자연·환경적 요인을 분석하는 것이다. 본 연구는 **요인분석(factor analysis)**을 통해 **홍수 영향 요인**을 도출하였다. 5개의 요인이 도출됐으며, 도출된 요인들의 공간 분포를 확인했고 침수 피해정도를 결정하는 인자를 알아보았다. 주요 영향인자는 **유수인자, 기상인자, 생태인자**로 도출되었다. 요인분석으로 도출된 요인들은 **포아송 회귀분석(Poisson regression)**을 통해 침수 피해에 영향을 미치는 변수의 중요도(variable importance)를 알아보았다. 그 결과, 유수인자가 가장 높은 영향력을 보였다. 이 요인이 분포되어 있는 지역들은 지형의 기복이 크고 물이 흘러들어가 잘 모이는 지역일 가능성이 크다. 특히, 유역지역, 하천변에서 홍수피해가 클 것으로 추측된다. 공간 분포를 확인하였을 때, 물이 모이는 지역이 서울 곳곳에 존재하였다. 따라서 이런 지역에 대한 배수와 유수 확보가 필요하다. 특히, 유역과 하천의 관계를 파악하여 유역별 관리가 이루어져야 하며 이에 대한 연구가 활발히 진행될 필요가 있다.

주요어 : 도시홍수, 침수피해, 요인분석, 포아송 회귀분석, 서울시

Abstract : The purpose of this study is to investigate the spatial and environmental factors affecting flood damage in the city of Seoul during the period of 2010 to 2014. This research employed factor analysis to investigate the characteristic of each variable in relation to flood damage and to identify potential areas that are vulnerable to flood. Five factors were extracted, their spatial distribution observed, and verified whether they were influential factors in flood damage. Following this analysis, the main factors of influence were derived to be water flow, meteorological and ecological factors. Then using Poisson regression, the variable importance of these factors on flood damage was analyzed. The result suggests that geomorphic factor related to water flow (including curvature and terrain characterization index) most prominent in flood damage. Area with high water flow impact are likely to have bigger curves in the terrain and conducive for water convergence. According to analysis of spatial distribution, these areas are normally located near rivers and streams, which exist in various areas throughout Seoul. Therefore, it is necessary to secure drainage and water flow infrastructure in these areas. Further studies need to be conducted analyzing the relationship between watershed and rivers for efficient management of each watershed.

Key Words : urban flood, flood damage, factor analysis, Poisson regression, Seoul

I. 서론

IPCC 제5차 평가보고서(2014)에 따르면 산업화, 도시화에 따른 온실가스 배출량은 계속 증가해 오고 있다.

이러한 온실가스의 증가로 한국의 경우 기온은 전 세계 평균 기온(0.6°C)보다 높은 약 1.5°C 상승하였고, 각종 GCM(Global Circulation Model)에 의한 기후변화 예측결과를 보면 기온이 약 4°C 상승할 것으로 전망되고

* 이 논문은 2016년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원(NRF-2016S1A5B8924523)을 받아 수행되었다.

** 서울대학교 지리학과 교수/서울대학교 아시아연구소 소장(Professor, Dept. of Geography, Seoul National University/Director, Seoul National University Asia Center, catena@snu.ac.kr)

*** 교신저자, 서울대학교 지리학과 석사수료(Master Student, Dept. of Geography, Seoul National University, index2015@snu.ac.kr)

있다(운용남, 2009). 전 지구적인 온난화로 다수의 극한 기상 및 기후 현상에 따른 다양한 수문요소들의 변화가 관측되었다(고태규·이원영, 2012). 특히 강수량의 변화는 일정하지 않을 것으로 나타났다. 이러한 강수현상의 변화는 수문시스템에 영향을 미치며 폭풍해일, 국지성 호우, 홍수와 같은 물 관련 재해를 증가시킨다(운용남, 2009). 물 관련 재해로 인한 손실은 전 지구적, 지역적으로 최근 수십년간 현저히 증가하고 있으며(IPCC, 2014), UN DESA(2011; 이상은 등, 2016 재인용)의 세계 도시화 전망 보고서에 의하면 전 세계 많은 도시가 물 관련 위험에 노출되어 있고 인구와 경제활동이 집중되어 위험이 지속적으로 증가할 것으로 전망된다.

우리나라의 경우 최근 20년(1992-2011년)간 자연재해별 피해액 통계에 따르면 호우 및 태풍 등 집중강우에 의한 홍수 피해액이 전체 재해 피해액에서 92%를 차지(소방방재청, 2012)하고 있어 홍수가 우리나라의 주된 재해임을 확인할 수 있다. 특히 도시지역에서 재해가 급증하는 추세이며, 도시의 인구증가와 지하공간의 높은 활용도, 건물 증가, 불투수면 포장 등으로 인한 배수 및 투수 면적의 축소로 물적 피해가 증가하는 결과를 낳았다(최충익, 2003).

서울은 타 도시 보다 인구밀도와 토지이용변화가 더욱 높을 수밖에 없으며 이는 수해를 입을 수 있는 잠재력이 크다(윤중석 등, 2013). 서울시의 침수피해는 전역에 걸쳐 분포되어 있으나 연도별로 침수 피해가 일어나는 곳이 일정하지 않고 지역적 편차가 크다(신상영·박찬열, 2014). 실제로 1990년대 서울시의 수해는 서울시 전역에 걸쳐 발생하였으며 단시간에 강한 비가 내림으로 한강수위가 상승한 상태에서 지속된 호우로 인한 침수가 주로 일어났다(강현웅, 2015). 하지만 2000년대에 들어서며 국지적이며 집중적인 강우로 서울 지역 곳곳에 돌발 홍수가 발생했다(강현웅, 2015).

홍수피해는 일반적으로 외수와 내수로 인한 침수피해로 구분할 수 있다. 외수피해는 하천 및 지천들의 범람, 제방의 붕괴 등으로 발생한 것이며, 내수 침수피해는 배수로, 하수도, 펌프장과 같은 배제 능력의 부족이 주된 원인이다(김윤종 등, 2002). 과거 도심지역의 침수 피해 형태는 외수피해가 주를 이루었으나, 2000년대 이후에는 도시지역 내부의 물이 원활하게 외부로 빠져나

가지 못해 발생하는 내수침수가 주된 양상을 보이고 있다(김윤종 등, 2002). 침수피해의 원인은 복합적이나 지역적 여건에 따라 피해원인의 기여도나 요인 관계에 차이가 있다(신상영·박찬열, 2014). 산지로 구성된 지형적 요인 때문에 집중호우 시 하류의 인구와 기반 시설이 밀집되어 있는 도시지역으로 유출량이 급속히 증가되어 피해가 발생하기도 하며(이상은 등, 2016), 단순히 불투수면의 증가로 설계 강우를 초과하고 침수피해를 발생시키기도 한다(신상영·박찬열, 2014). 그러므로 향후 홍수피해를 최소화하기 위해서는 침수에 대한 취약 원인과 영향요인을 정확히 분석해야 할 필요가 있다.

홍수피해에 관한 연구들은 홍수 취약성평가, 홍수위험도 평가, 홍수 위험지수개발 등이 진행되어 오고 있다. 김지수 등(2013)은 IPCC에서 제시한 기후변화 취약성 개념을 서울시에 적용하여 홍수 영향 변수들과 피해건수의 상관성을 분석하여 상관계수를 가중치로 활용한 취약성모형을 만들어 홍수에 취약한 지역을 살펴보았다. 침수 모델링 연구의 경우 미래의 확률 강우량을 선형 회귀식으로 나타내어 미래의 서울 침수지를 통계적으로 전망하였다(성장현 등, 2012). 심준석 등(2014)의 연구에서는 GWR모형을 활용하여 홍수재해 위험요인이 피해지역별로 다른 영향을 미치고 있음을 확인하였으며, 도시침수내수피해액을 사용하여 위험 요인을 도출 해냈다. 이들 연구는 미래의 침수피해 금액을 추정하기도 했으며, 피해액을 종속변수로 활용하고 있다. 피해액은 대상지가 가지고 있는 재산 가치에 상관성을 가진다. 따라서 본 연구에서는 도시가 가지고 있는 지역적 특징에 중점을 두어 연구하고자 한다.

도시홍수피해 영향인자에 관한 연구와 관련하여 김보경 등(2011)의 연구에서는 홍수 피해와 관련된 자료를 수집하고 요인분석을 활용해 자료를 축소, 특성을 파악해 홍수 영향 요인을 도출하였다.

도시홍수 위험도 평가와 관련된 연구로 박민규 등(2012)의 연구에서는 수해취약성인자를 도출하여 도시 침수지역 위험도를 평가하고 과거 도시침수위험도를 비교하여 침수위험도 평가기법을 제안하였다. 연구지역이 유역지역임에도 불구하고 고도와 같은 기본적인 자연 변수를 활용하여 공간 영향력을 도출하는데 한계가 있었다.

여러 논문에서는 사회경제적, 인위적인 요인을 근거하여 침수피해를 분석을 하였거나 기본적인 자연 요인만 고려하여 연구되고 있었다(윤중석 등, 2013). 이미 서울은 침수피해를 예방하기 위해 인위적 수방시설을 배치하거나 개선하는 등의 문제점을 개선했음에도 동일한 피해가 일어나고 있다는 점에서(최충익, 2013a) 다양한 자연·환경적 요인을 고려해볼 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 자연·환경적 요인을 고려하여 적용하고자 한다.

선행연구는 대체로 피해액을 종속변수로 두어 재산 피해에 중점을 맞추거나, 고도, 경사도와 같은 기본적인 자연변수만을 활용하였고 연구지역이 일부 자치구에 한정되어 있었다. 따라서 본 연구에서는 지난 5년간 서울시 전역의 침수피해정보를 활용하였고, 침수피해 지역의 다양한 지형 및 자연환경 요소들을 분석에 적용하여 침수피해의 주요원인에 대해 연구하고자 한다. 본 연구는 서울시를 대상으로 다양한 자연환경적인 요인들을 분석하여 홍수피해의 원인을 반영하는 요인들을 파악하는 연구라는 점에서 다른 연구들과 차별점이 있다.

본 연구의 목적은 서울시를 대상으로 침수 피해에 미치는 지리적, 환경적 영향요인들을 파악하여 침수 원인을 밝히고자 한다. 보다 구체적인 연구목적은 다음과 같다. 첫 번째로, 서울시 침수 피해에 영향을 미치는 자연·환경적 변수들을 개별적으로 회귀분석 하여 침수 영향인자들을 확인한다. 두 번째로, 요인분석을 통해 서울시 침수를 구성하는 각각의 영향인자들이 어떠한 요인들과 연관되어 있는지 판단하고 공간 분포를 확인한다. 마지막으로 요인분석을 통해 도출된 요인들을 활용하여 회귀분석하여, 침수 피해의 원인을 알아본다. 본 연구는 도시홍수 피해지역의 효율적인 방재계획을 수립하기 위해 기초자료를 제공할 수 있다는 점에서 의의가 있다.

II. 연구자료 및 방법

1. 연구자료

본 연구에서는 서울시를 공간 범위로 설정하였다.

서울은 인구나 자본이 고도로 밀집되어 있는 공간이며, 지형학적으로 산지 주변의 구릉지와 수변지역이 많아 수해에 취약하다(최충익, 2013b). 분석에 사용된 자료는 2010년부터 2014년까지의 서울시 수해 이력으로, 수해와 같은 재해¹⁾로 인한 재난지원금을 지급하기 위해 피해지와 피해액, 지원금지급금액이 기록된 자료이다. 수해는 기상특보가 발효된 시기 중 입었던 피해를 대상으로 신고 받은 지역과 그 내용을 기초로 피해사실을 확인한 후 재난 지원금을 지급하였다. 재난 지원금은 피해의 정도에 따라 차등지급²⁾하였다. 본 연구에서는 이러한 서울시 수해이력 자료를 활용하여 분석에 사용하고자 한다.

본 자료는 최근 5년간 수해지에 관한 자료이기 때문에 실증적 분석이 가능하다. 분석에 사용된 종속변수는 침수 발생건수이다. 서울시에서는 지난 5년간 총 40,917건의 침수가 발생했다. 이 데이터는 침수 피해지의 기록된 주소를 활용하여 지오코딩(geocoding)하였다. 지오코딩 소프트웨어를 활용해 침수가 일어났던 장소에 경위도가 할당되었으며 자료는 ArcMap을 통해 점 데이터 형태로 나타낼 수 있었다. 분석에 사용된 종속변수는 침수의 빈도 값을 추출해내기 위해 서울시 전 지역을 가로100개 세로 100개의 격자로 나누었고, 단위 격자(300m × 300m)로 나누어 분석하였다. 10,000개의 격자에 지오코딩된 자료를 중첩시켜 각 격자 내에 점들의 개수를 추출 하여 종속변수로 사용하였다. 분석 후, 서울시를 마스크(masking)하여 총 5,394개의 격자만 남았다.

분석에 앞서 침수발생빈도의 공간 특성을 알아보았다. 이에 Ripley(1976)가 제안한 K-함수(K-Function)를 통해 서울시 침수발생지의 공간 거리의 특성을 확인하였다. K-함수는 점이 군집되어 있는지 아니면 무작위로 분포하고 있는지 알아보는 방법으로서, 점의 수와 일정 거리 내에 분포하는 점의 수를 비교하는 방법이다(곽한빈 등, 2010). 침수 빈도값을 나타내는 점사이의 거리연산을 통해 추출한 군집정도를 의미한다. K-함수의 결과는 그림 1과 같이 그래프로 나타낼 수 있다.

점선으로 표시된 선은 모의범위(simulation envelope)로 무작위 형태가 나타날 때 K-value가 모의범위 아래에 나타나며 군집 형태가 나타나면 K-value가 모의범

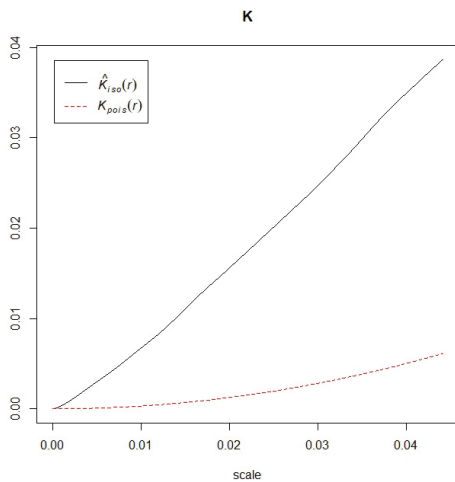


그림 1. K-함수 결과 ($\hat{K}(r)$: 각 거리별 실제점 사이의 거리연산 값, (r) : 무작위 분포일 경우 기대되는 값)

위 위에 나타난다. 그림 1과 같이, K-함수에서 모든 값들이 모의범위에 웃돌았기 때문에 서울시의 침수 피해 패턴은 뚜렷한 밀집현상을 보이는 것으로 나타났다 (Dixon, 2002).

포아송 회귀분석(Poisson regression)과 요인분석

(factor analysis)이 사용된 독립변수들은 침수피해와 관련된 선행연구들을 고찰하여 선정하였다. 독립변수는 기상 지표, 자연지형 관련 지표, 인위적 지표로 구분하였다(표 1).

기상 지표들은 침수 유발과 관련된 기상 변수들로 한 시간 최대 강수량, 일평균 강수량을 고려하였다. 기상청 기준, 1시간에 30mm 이상이나 하루 80mm 이상의 비가 내릴 때 집중호우라고 정의했으며 (강정은·이명진, 2012), 이를 토대로 평균 강수량과 한 시간 최대 강수량을 기상요인으로 고려하였다. 기상 지표는 기상청 국가기후데이터 센터에서 제공하는 자료로, 해당 기간에 일어난 침수일자의 강수량을 서울시 내에 30개의 기상관측소에서 관측된 강수량 자료의 평균값을 구하여 IDW(Inverse Distance Weighting)로 내삽 하였다.

침수는 지형적 여건에 따라 유량이나 유속, 유수에 따라 배수의 정도가 달라지기 때문에(고태규·이원영, 2012), 자연지형적 지표들은 물의 이동, 흐름 등을 고려하여 선정하였다. 위치의 높고 낮음을 나타내는 고도와 고도의 변화를 측정하는 개념인 경사도와 같은 요인들은 유출속도에 영향을 미치는 요인이며 침수피해율이

표 1. 분석에 사용된 자료와 그 의미

인자 특성		자료 유형	단위	자료 출처	참고문헌
대분류	소분류				
지 형	하천과의 거리	연속형	m	하천망도 - 환경부 침수 지점과 가장 가까운 하천의 거리를 ArcMap을 활용해 측정	강정은 등, 2012
	고 도	연속형	m	SRTM 30m DEM	신상영, 2011
	경사도	연속형	°	SRTM 30m DEM	윤중석, 2013
	사면곡면률	연속형		SRTM 30m DEM	강정은 등, 2015
	사면유역지수	연속형	$\log_{10}m^2$	SRTM 30m DEM	
	습윤지수	연속형		SRTM 30m DEM	
	지형특성지수	연속형		ArcMap을 활용, 공간통계 - 사면유역지수 * 곡면률	
	불투수율	연속형	%	2010년 도시생태현황도 내에 불투수면적 추출(서울도시계획포털)	강정은 등, 2015
	녹지율	연속형	%	2010년 도시생태현황도 내에 녹지현황 추출(서울도시계획포털)	김지수, 2013
	토양목	범주형 (4범주)		서울시는 4개의 토양목으로 구분됨. 올티졸(ultisols), 알피졸(alfisols), 엔티졸(entisols), 인셉티졸(inceptisols)을 포함함	강정은 등, 2012
기 상	일 평균 강수량	연속형	mm	IDW 내삽법, 30개 + α^3 기상관측소(기상청 국가기후데이터센터)	강정은 등, 2012
	한시간 최대 강수량	연속형	mm		
	토지피복도	범주형 (22범주)		2009년 중분류 토지피복도(환경부)	신상영, 2011

달라지는 경향이 있다(신상영, 2011).

물의 양을 추정하고 모이는 경향을 볼 수 있는 지표로 사면유역지수(upslope contributing area)와 습윤 지수(wetness index)가 있다. 사면유역지수는 사면상의 한 지점으로 유입되는 물의 양을 추정하는 변수로(박수진, 2004), 사면유역지수가 높은 값을 띄는 곳이 물의 유입이 비교적 높고 이는 침수 가능성을 나타내는 변수라고 판단하였다. 습윤지수는 사면유역지수를 경사도로 나눈 값이 되므로, 습윤지수가 높은 곳은 물이 모이는 곳(남서정, 2011)으로 침수 가능성을 나타내는 변수라 판단했다.

물의 침투에 영향을 주며 이동속도에 영향을 미치는 지표로는 사면곡면률(surface curvature)(Evans and Cox, 1999)과 지형특성지수(Terrain Characterization Index; TCI)를 고려하였다. 사면을 따라 물질이동 잠재력을 추정한다는 점에서(박수진, 2004) 물이 모이기 쉬운 곳이 침수가능성이 높다고 판단하였다.

투수율은 지형내부의 정보를 가지고 있는 지표인 토양목과 식물의 비율을 의미하는 녹지율을 포함시켰다. 토양과 식생의 저류량에 따라 강우 유출량은 다르게 나타난다(박성천 등, 2011).

하천과의 거리는 하천수위상승에 따른 내수범람이나 하천변 저지대에 주로 발생한다는 점에서(국토연구원, 2008) 하천과의 거리 인자를 선정하였다. 침수 발생 지점에서 가장 가까운 하천의 거리를 측정하였다. 하천과의 거리를 측정하기 위해 사용하였던 하천은 환경부에서 제공하는 자료로 ArcMap에서 'distance' 분석 도구를 사용해 거리를 추출하였다.

인위적 지표로는 불투수율과 토지피복도를 추가하였다. 불투수성 면적의 증가는 유출량이 크게 증가하여 홍수요인으로 나타난다(고태규·이원영, 2012). 토지피복도는 사람들이 모이고 많은 시설물들이 밀집한 지역에서 많은 피해를 유발하는 특징을 가졌다는(최충익, 2004)점에서 선정하였다. 불투수율은 서울도시계획포털에서 제공하는 2010년 서울시 도시생태현황도에서 불투수면적을 추출한 자료이며, 토지피복도는 국토환경정보센터에서 제공하는 2009년 토지피복도를 사용하였다.

모든 인자들은 10,000개의 격자와 이들을 공간 데이

터화 된 자료위에 중첩시켰다. 연속형 자료는 평균값을 계산하였고, 범주형 자료는 주요(Major)값을 추출해내어 각 격자 내에 포함시켜 분석에 사용하였다.

2. 침수피해원인 분석 방법

본 연구는 서울시 침수피해의 자연·환경적 특성을 알아보기 위해 3가지 관점에서 접근한다. 첫 번째 접근 방법은 서울시 침수 피해에 영향을 미치는 자연·환경적 변수들의 영향인자를 확인하기 위해 포아송 회귀분석을 실시하였다. 두 번째로, 침수 피해에 영향을 미치는 잠재 요인들을 추출하고 공간 분포를 확인한다. 자연·환경적 요인을 추출하기 위해 요인분석을 사용하였고, 추출된 요인은 지도화시켜 공간 분포를 확인했다. 마지막으로, 요인분석을 통해 도출된 요인들을 사용해 포아송 회귀분석하여 어떤 요인이 침수 피해에 주된 원인이 되는지 알아보았다.

1) 포아송(Poisson) 회귀분석

포아송 회귀분석은 실제로 서울시 침수 피해에 영향을 미치는 자연·환경적 변수들의 영향인자를 확인하기 위해 사용되었다. 더불어 요인분석을 통해 도출된 요인들을 활용해 침수 피해의 원인을 알아보기 위해 사용되었다. 회귀분석 중에서도 포아송 분포(Poisson distribution)를 통한 모델링을 시행하였다. 포아송 분포는 일정 시간 및 공간에서 한 사건의 출현횟수를 갖는 분포이다. 연구에서는 서울시 전체 지역을 가로 300m, 세로 300m의 격자로 나누어 격자 내 5년간의 침수 피해 빈도수 횟수를 추정한다. 따라서 서울시에서 발생하는 침수피해 횟수는 특정 공간 내에서 발생한다고 가정할 수 있으며, 자료의 형태가 비연속형이다. 두 번의 분석에서 사용된 종속변수가 같다는 점에서 두 분석 모두 포아송 회귀분석을 활용하였다. 포아송 회귀분석은 R 프로그램을 사용하였다.

설명변수를 선정하는 과정은 단계적(stepwise) 선택법을 사용하였다. 불필요한 변수를 제거함으로써 모형의 정확성을 높였다. 단계적 선택법이란 가장 많은 설명력을 가진 설명변수를 선택하여 모형에 포함시키되 새로 추가되는 변수 중 설명변수로 필요 없는 변수가 있을 경우 제거해나가는 기법이다. 변수들의 추가 또는 제

거를 반복하면서 최적의 설명변수들만 모형을 만들어 가는 방법이다. 초기 모델의 값은 $AIC=165591.2$ 이다.

이러한 과정을 거쳐 회귀분석을 시행했고 서울시의 상습 침수 피해를 유발하는 주된 자연적인 환경 인자가 무엇인지 파악할 수 있었으며 피해 원인을 알아볼 수 있었다.

2) 요인분석(Factor Analysis)

서울시 침수에 영향을 미치는 자연 및 환경적 요인을 추출하기 위해 요인분석을 사용하였다. 요인분석을 통해 침수피해 영향인자들에 내재되어 있는 특성을 탐색하여 잠재변수를 도출하고, 침수에 영향을 초래하는 주된 변수에 대해 알아보고자 하였다. 본 연구에서 사용되는 모형은 주성분분석(Principal Component Analysis; PCA)으로 관찰 변수들을 가능한 적은 수의 요인으로 줄이는데 그 목적이 있다(강현철, 2013). 주성분분석은 관찰변수보다 적은 차원으로 자료를 축소하는 것이 목적이기 이들 분산 중 최대한 설명되어지는 주성분이 존재한다(김청택, 2016). 그러나 요인분석에선 주성분이 없고 축소된 요인들의 성분에 의해 전체 변동을 설명한다.

요인적재값을 추정하기 위한 방법은 자료에 부합하는 요인의 개수를 결정하여 분석을 시행하고 있다(강현철, 2013). 따라서 분석에 활용될 최적 요인 수를 결정해야 한다. 최적의 요인수를 구하는 방법은 카이저(1960)의 법칙(Kaiser's rule)을 활용하였다. 카이저 법칙은 고유값(eigenvalue)⁹⁾이 1이상인 첫 구간에서 요인의

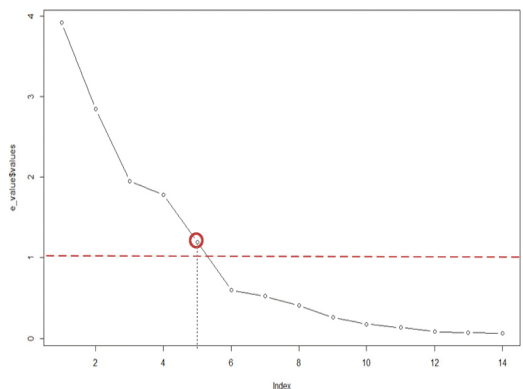


그림 2. 스크리 도표를 활용한 최적의 요인 수: 고유값이 1 이상인 첫 구간은 5로 도출됨

개수를 선정하는 방법이다. 침수 영향인자의 요인분석에 활용될 최적의 요인 수는 그림 2와 같다. 고유치가 1 이상인 첫 구간은 5가 나왔다. 따라서 분석에 활용될 요인 수를 5로 결정하였다. 5개의 요인들은 개별 영향인자들의 높은 값을 도출 및 구성하여 잠재변수(latent variable)로 만들어진다.

요인분석은 격자 내에 침수영향인자들의 값을 추출하여 시행하였다. 침수피해 영향인자들의 공간 분포를 살펴보기 위한 지도는 요인분석 후 도출된 잠재변수들의 수치 값으로, 요인분석 과정에서 격자 내에 부여된 수치 값을 토대로 만들어졌다. 잠재변수들의 수치 값은 정도를 나타내기 위해 ArcMap프로그램의 분류(classification)기능을 활용해 5등급으로 분류하였다. 분위(quantile)⁵⁾별로 분류함으로써 침수피해의 영향을 미치는 인자들이 어느 지역에 주로 분포하고 있는지 파악할 수 있었다.

III. 연구결과

1. 침수 피해에 영향을 미치는 자연·환경인자

침수 피해에 영향인자들의 유의성을 확인하고 지난 5년 동안(2010년부터 2014년까지) 서울시에서 어떤 요인이 침수 피해에 주된 영향을 미쳤는지 알아보기 위해 관계추정모형을 근거로 하는 포아송 회귀분석을 시행하였다. 회귀분석결과 각각의 토지피복도를 제외한 모든 인자들이 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타났다.

회귀분석 후, 서울시 내에 어떤 요인이 침수 피해에 가장 많은 영향을 미치는지 알아보기 위해 변수 중요도(variable importance)를 알아보았다. 변수 중요도는 R 프로그램의 'caret'패키지를 활용하여 구하였다.

모든 설명변수들에 대한 중요도는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 회귀모형 내에서 가장 높은 중요도를 보였던 변수는 하천과의 거리로 약 49%를 차지하고 있었다. 다음으로 높은 설명력을 가지는 변수들은 46%대의 불투수면, 평균 강수량으로 나타났다. 반면, 각각의 토지피복도는 1% 미만의 값으로 도출되어 가장 낮은

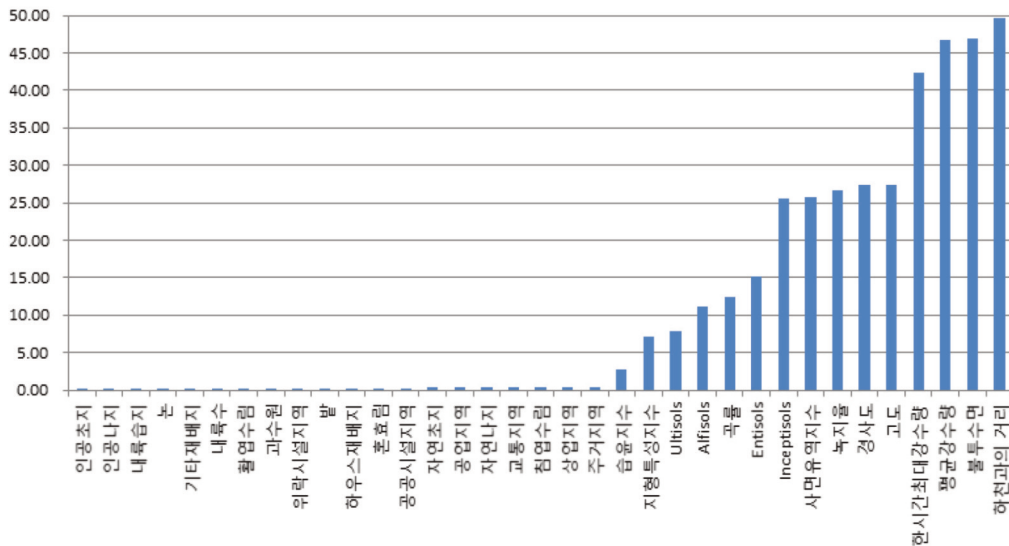


그림 3. 회귀모형에서 각 변수의 변수 중요도(x: 각 변수들 y: 변수 중요도)

값을 차지하였다.

하천과의 거리, 불투수면, 평균 강수량과 한시간 최대 강수량이 침수피해 높은 영향을 미치는 것으로 보인다. 이러한 분석 결과는 하천주변의 불투수면의 증가로 홍수를 가중시킨다는 고태규·이원영(2012)의 연구와 같이 수변지역의 취약성이 증가하고 있다는 점에서 본 연구와 유사성이 있다. 강정은 등(2012)의 연구에서는 홍수 취약성의 전체적인 공간 분포를 살펴보면, 한강을 중심으로 본류 양안에 위치한 지역이 취약한 지역임을 확인하였다.

서울은 불투수면적이 타 시도보다 높아 폭우가 내렸을 때 빗물이 스며들거나 흘러들어갈 공간이 상대적으로 적어 침수피해가 높다(최충익, 2013b). 이는 폭우가 내리면 제대로 처리할 수 없다는 점에서 불투수율과 기상인자의 복합적인 요인에 의해 침수 피해가 가중됨을 알 수 있다. 평균 강수량과 한시간 최대 강수량이 높은 영향을 미친다는 결과는, 신상영(2011)의 연구에서 폭우 및 집중호우가 2010년과 2011년의 서울시 침수피해의 원인이라 밝힌 연구와 연관성을 가진다.

2. 서울시 침수 발생인자에 대한 요인분석

요인분석 결과를 살펴보면 표 2와 같다. 표 2를 토대로 5개의 잠재변수들의 구성인자를 선정하기 위해 높

은 값이 도출된 인자들을 살펴보았다. 높은 요인 적재 값(factor loading)을 순서로 요인들이 나타나있다. 주성분 중요도(proportion var)는 각 요인이 설명하는 총 분산의 비율을 말한다. 요인1이 21%, 요인2이 20%, 요인3이 17%, 요인4가 17%, 요인5가 13%를 설명하고 있다. 따라서 5개의 잠재변수들은 총 88%를 설명한다고 볼 수 있다.

5개의 잠재변수들은 11개의 모든 요소 값들을 포함하고 있으며, 요인별로 높은 값들이 나타나있다. 요인1에서는 경사도 0.91, 불투수면 -0.55, 고도 0.89로 가장 높은 값이 도출되었다. 요인2에서는 한시간 최대강수량 0.96, 평균 강수량 0.95으로 나타났다. 요인3은 사면곡면률 0.95, 지형특성지수(TCI) 0.97로 나타났다. 요인4는 습윤지수 0.84, 사면유역지수 0.91로 나타났다. 마지막으로 요인5는 하천과의 거리 -0.81, 녹지율 0.73값이 도출되었다.

높은 값이 도출된 요소들을 중심으로 요인들을 구분해 보았다. **요인1은 고도, 경사도, 불투수면을 포함하고 있으며 물이 흐르는 속도와 관련된 지형환경인자라고 할 수 있다.** **요인2는 평균 강수량과 한시간 최대 강수량을 포함한 기상인자로 볼 수 있다.** **요인3은 곡률과 지형특성지수(TCI)를 포함하고 있고, 물의 흐름과 관련된 지형인자로 볼 수 있다.** **요인4는 습윤지수, 사면유역**

표 2. 서울시 침수 발생인자에 대한 요인 분석의 결과

요 인	유속인자	기상인자	유수인자	유량인자	생태인자	공 통 성	고유분산
한시간 최대 강수량	0.02	0.96	0.01	0.05	0.12	0.94	0.062
일 평균 강수량	0.04	0.95	-0.01	0.03	0.22	0.96	0.043
습윤지수	-0.45	-0.01	-0.06	0.84	0.1	0.92	0.077
경 사 도	0.91	0.03	0.04	-0.28	0.08	0.91	0.09
사면곡면률	0.15	0.01	0.95	-0.13	0.03	0.95	0.05
식 생 율	0.41	0.09	0.09	0.26	0.73	0.78	0.216
T C I	-0.02	-0.01	0.97	-0.1	0.01	0.96	0.04
사면유역지수	-0.04	0.06	-0.2	0.91	0.09	0.89	0.111
불투수면	-0.55	0.44	-0.07	-0.27	0.35	0.71	0.294
고 도	0.89	0.07	0.07	-0.16	0.06	0.83	0.17
하천과의 거리	0.17	-0.33	0.02	-0.01	-0.81	0.8	0.199
요인 적재값	2.35	2.15	1.92	1.82	1.41		
주성분 중요도	0.21	0.2	0.17	0.17	0.13		
누적합인	0.21	0.41	0.58	0.75	0.88		
합인설명력	0.24	0.22	0.2	0.19	0.15		
누적중요도	0.24	0.47	0.67	0.85	1		

지수로 구성되어 있으며 물이 모이는 지형 변수라고 할 수 있다. 요인5는 하천과 거리와 녹지율을 포함하고 있어 생태인자로 명명하였다.

3. 서울시 침수피해 영향 요인별 공간분포

각 수해영향인자들에 대한 영향을 수치화 시킨 모든 잠재요인들을 지도화 시켜봄으로서 요인별 영향의 공간 분포를 확인해 보고자 한다. 지도는 요인분석과정에서 도출된 잠재변수별 요인적재값을 활용하였다. 요인별로 추출된 수치는 분위(Quantile)별로 5등급으로 분류하여 침수피해 영향요인이 차지하는 공간의 정도를 표현하였다.

분포를 5개로 구분하여 붉은색, 주황색, 노란색, 연두색, 녹색으로 표시하였다. 이는 분포의 정도를 의미할 뿐, 침수의 빈도를 나타내지 않는다.

1) 유속인자의 공간 분포

물의 이동 속도와 관련된 지형인자를 지도화 시켜 보았을 때, 그림 4와 같이 나타났다. 붉은 값의 의미는 고도와 경사도가 낮고 불투수율이 높은 지역을 의미한다. 초록색 지점이 많이 나타나는 지점은 고도와 경사가 높고 불투수율이 낮은 지역을 의미한다. 가장 높은 분포

가 나타난 지역들은 시내에 무작위로 분포되어 있거나 주로 하천변에 위치하고 있었다. 반면 낮은 값들이 분포되어 있는 지역은 서울시 외곽에 위치한 산간지역이거나 남산, 올림픽 공원과 같은 도심내의 공원이나 산지 지역으로 나타났다.

그림 4를 살펴보면 붉은 지점들이 하천을 따라 분포되어 있음을 확인할 수 있었다. 이는 하천변 저지대 지역으로 추정된다. 하천변 저지대 지역은 전형적인 범람원이었던 곳으로, 침수피해가 빈번하게 일어난다(고태규·이원영, 2012). 실제로 서울시의 하천변 저지대 지역은 하천수위 상승시 우수배제가 원활하게 이루어지지

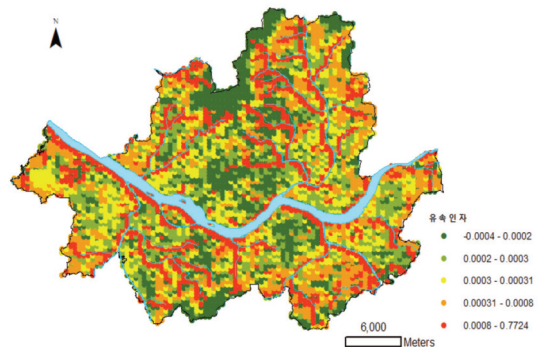


그림 4. 유속인자의 공간 분포

못하는 등 다양한 원인이 산재해 있다. 강서구, 양천구 화곡동 일대는 저지대이며, 하수관거의 경사확보가 어려운 지역으로 홍수에 취약한 지역으로 2010년 9월 21일 집중호우로 큰 침수피해가 발생한지역이다(고태규·이원영, 2012). 강서, 양천 지역은 목동신시가지로 자연배수가 제한되는 지역으로 상습침수를 발생시키고 있다. 이는 유속인자의 공간 분포는 불투수율과 저지대에서 침수 영향을 받고 있음을 추측할 수 있다.

2) 기상인자의 공간 분포

침수피해에 있어 강수량은 침수피해에 영향을 미치는 가장 근본적인 요인이라 할 수 있는데 이를 포함하고 있는 기상인자를 그림 5와 같이 지도화 하였다. 붉은 값의 의미는 기상인자가 높은 지역을 의미한다. 초록색 지점은 기상인자가 적은 지역을 의미한다.

그림 5에서 붉은 점들은 주로 하천망을 따라 나타나고 있으며, 동부지역을 중심으로 집중되어 있음을 확인할 수 있었다. 안양천과 같은 하천주변과 여의도, 한강망원지구, 북한산에서 주로 나타났다. 기상인자의 공간 분포를 통해 지난 5년간 서울시 강수량 양상이 동부지역, 하천변에 집중되어 있음을 알 수 있다. 이는 IDW분석을 통한 평균 강수량 분포도에서 강수량이 많은 곳은 주로 서울 동쪽과 한강 망원지구에 위치하고 있다는 점에서 확인할 수 있다. 이를 그림 5와 비교해보았을 때, 기상인자의 분포와 서울시 평균 강수량이 비슷한 양상이 나타날 수 있음을 알 수 있다. 기상청의 자료를 활용하여 2010년부터 2014년 강우 양상을 살펴보았을 때, 동부지역에 강우가 집중되었음을 확인할 수 있다.

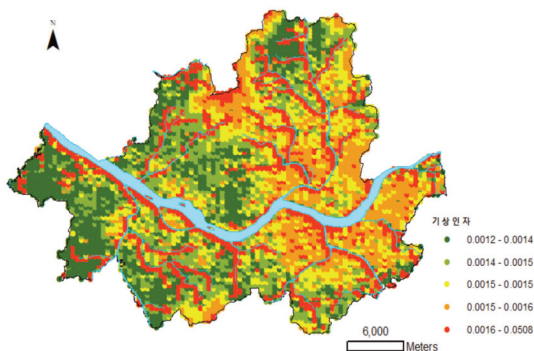


그림 5. 기상인자에 대한 공간 분포

일반적으로 우리나라의 강우 특성은 국지성 강우인데, 지난 5년간의 서울시 집중강우 지역과 집중강우로 인한 피해지역이 상당 부분이 일치하는 것을 확인 할 수 있었다.

3) 유속인자에 대한 공간 분포

붉은 지점은 곡률의 불룩한 정도가 크고 지형특성지수가 높은 지역을 의미한다. 녹색 지점이 많이 나타나는 지점은 지형이 오목할 가능성이 크고 지형특성지수가 낮은 지역을 의미한다. 그림 6과 같이 붉은 지점이 나타난 지역들은 산지인 것으로 나타났다. 반면 초록지점들이 나타난 지역은 하천주변으로 도출되었다.

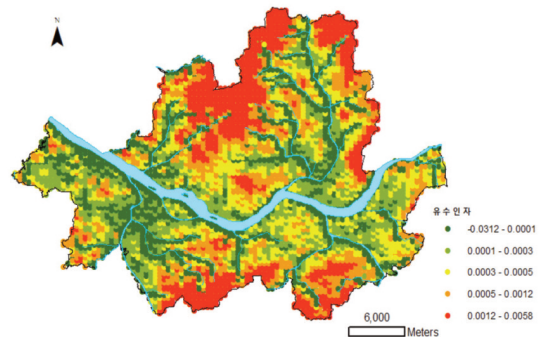


그림 6. 유속인자의 공간 분포

사면곡면률은 사면의 형태를 3차원적으로 보여주어 물의 흐름을 파악할 수 있게 한다. 지형특성지수는 사면곡면률과 사면유역지수로 결합하여 만들어진 결과이며, 토양지형면을 구분하는 목적으로 사용된다(박수진, 2004). 지형특성지수는 산지 사면에 따라 양의 값이 도출될 경향이 크다. 따라서 붉은색이 나타난 지역은 주로 산간지역에 분포되어있으며, 녹색과 연두색이 나타난 지역은 하천주변에 분포되었다.

4) 유량인자에 대한 공간 분포

물이 모이는 지형인자의 공간 분포를 살펴보면 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 붉은 지점들은 습윤지수와 사면유역지수가 높은 지역을 의미한다. 가장 높은 분포가 나타난 지역들은 주로 서울시 외곽에 위치한 산간지역이나 하천변에 위치하고 있었다. 반면 낮은 값들이 나타난 지역은 시가지로 추측된다.

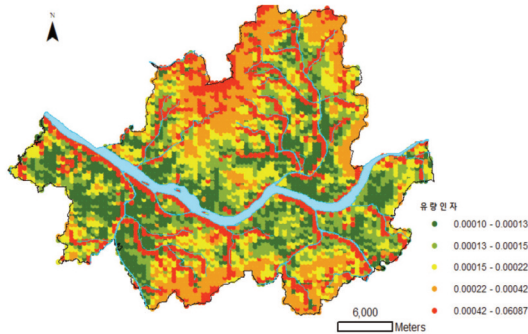


그림 7. 유량인자의 공간 분포

변수에 포함된 습윤 지수와 사면유역지수는 한 지점에서 물이 모이는 지표이기 때문에 홍수 분석에 있어 강우유출현상과 지형특성의 관계를 보여주는 척도로 활용된다(신상영, 2011). 사면유역지수와 습윤지수의 값이 높으면 토양수분량이 많다는 의미이며(남서정, 2011), 이는 침수의 가능성이 높아진다는 것을 의미한다.

그림 7과 같이 유량인자는 하천 인근과 산간지역에서 가장 많은 침수 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. 산지의 사면에 따라 물이 흘러 모이는 지점으로 보인다.

5) 생태인자에 대한 공간 분포

생태인자의 공간 분포를 살펴보면 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 붉은 지점들은 하천과의 거리가 가깝고 녹지율이 높은 지역을 의미한다. 반면 녹색지점은 하천과 거리가 멀고 녹지율이 많은 곳으로 분포되었다. 가장 높은 분포가 나타난 지역들은 주로 하천에 위치하고 있었다. 비교적 높은 분포를 나타내는 곳은 산간 지역으로 나타났다.

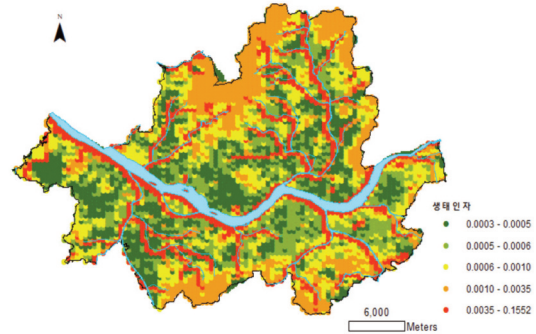


그림 8. 생태인자의 공간 분포

하천의 인접성인자는 서울시 하계망을 따라 높은 분포가 나타났다. 산지는 식생율이 높기 때문에 이러한 분포가 나타난 것으로 판단된다. 이는 하천근처에 녹지율이 높거나 단순히 하천과의 거리가 짧아 이러한 분포가 나타났다고 추측할 수 있다.

4. 서울시 수해지에 대한 회귀분석

앞선 연구에서는 서울시 침수피해 요인들을 요인분석을 통해 알아보았다. 요인분석에서 도출된 5개의 요인을 활용하여 서울시 침수 피해에 주된 영향을 미치는지 알아보기 위해 관계추정모형을 근거로 하는 회귀분석을 시행하였다. 요인분석 후에는 도출된 5개 잠재변수를 포아송 회귀분석하였다. 회귀분석결과 모든 인자들이 통계적으로 유의성이 있는 것으로 나타났다(표 3).

각 인자들의 침수피해 영향력 알아보기 위해, 포아송 회귀분석을 토대로 변수 중요도를 알아보았다. 회귀모형 내에 가장 높은 중요도를 차지하고 있는 요인은 유수인자로 33.04%의 설명력을 가지고 있었다. 다음으

표 3. 잠재변수 포아송 회귀분석 결과

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	유의성
(Intercept)	1234.55	27.96	44.16	<2e-16	***
유속인자	-253.66	11.69	-21.70	<2e-16	***
기상인자	-158.01	6.49	-24.36	<2e-16	***
유수인자	-2197.67	65.93	-33.34	<2e-16	***
유량인자	-710.99	15.55	-45.73	<2e-16	***
생태인자	-240.94	13.73	-17.55	<2e-16	***

유의정도: 0 '***', 0.001 '**', 0.01 '*', 0.05 '.', 0.1 '.', 1

°AIC: 153296

Number of Fisher Scoring iterations: 8

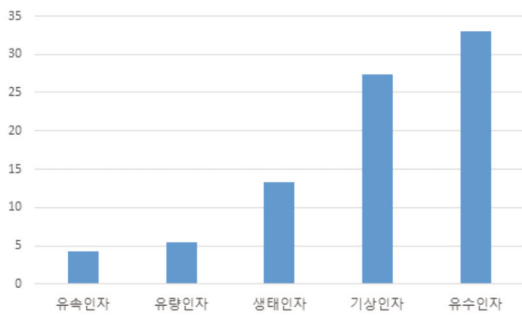


그림 9. 회귀모형에서 변수별 중요도(x: 잠재변수 y: 변수 중요도)

로 중요한 요인은 기상인자로 27.36%, 생태인자 13.25%의 설명력이 도출됐다. 개별 요인들은 요인분석 과정에서 여러 인자들과 묶이면서 그 영향력도 달라지는 것으로 나타났다(그림 9).

침수피해를 주는 영향인자로 는 크게 유수인자, 기상인자, 생태인자로 도출되었다. 이는 강수량을 비롯해 지면에 물이 모이기 쉬운 지형과 하천과 인접한 곳에서 피해가 두드러진다고 할 수 있다.

기존 연구에서 고려하지 못했던 자연지형적 요인들을 추가함으로써 서울시의 자연·지형적 특징을 확인할 수 있었으며, 영향인자들이 복합적인 상호작용을 이루고 있음을 확인하였다.

IV. 결 론

이 연구는 서울시를 대상으로 침수피해 영향인자와 공간 분포를 분석하여 침수피해의 영향인자를 파악하였다. 서울시의 침수 발생지 자료와 자연·환경적 인자들을 분석에 활용하였다. 침수피해에 영향을 미칠 수 있는 자연·환경적 요인들은 요인분석을 통해 추출되었다. 침수에 영향을 미칠 수 있는 요인들은 유속인자, 기상인자, 유량인자, 유수인자, 생태인자로 도출되었다. 각 자료들의 공간 분포를 지도화하고, 이들 요인들을 활용하여 실제로 침수피해에 영향을 미쳤던 요인들을 알아 보았다.

분석 결과, 유수인자는 가장 중요한 요인으로 도출되었다. 유수인자는 사면곡면률과 지형특성인자를 포함하고 있다. 유수인자의 공간 분포를 살펴보면, 홍수

피해가 크게 미치는 지역들은 지형의 굴곡이 크고 물이 흘러들어가 잘 모이는 지역일 가능성이 크다. 따라서 물이 흘러 모여드는 주위지역인 하천변에서 홍수피해가 클 것으로 추측된다. 또한 저지대뿐만 아니라 중·상류지역에서도 침수에 영향 받을 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 특히 빗물이 모여 하천으로 흘러들어가 는 지역을 파악하여 구역별 관리가 진행되어야 한다. 따라서 이에 대한 근거마련과 침수관리를 위한 적절한 유역단위에 대한 연구가 활발히 진행될 필요가 있다.

본 연구는 서울시의 다양한 자연환경적인 요인들을 분석하여 홍수피해 원인을 반영하는 요인들을 파악하는 연구라는 점에서 의의가 있다. 또한 도시홍수 피해 지역의 효율적인 방재계획을 수립하기 위해 홍수피해 원인을 반영하는 기초자료를 제공한다는 점에서 의의가 있다. 한편, 도시 지역의 침수피해를 정확히 파악하기 위해서는 사회경제적 특성에 대한 고려가 필요하다. 후속연구에서는 이러한 사회경제적 영향지표에 대한 데이터를 반영하여 도시지역 침수피해 요인에 대한 더욱 보완된 연구를 진행할 필요성이 있다.

註

- 1) 재해는 전파, 반파, 침수에 해당한다(자연재난 구호 및 복구비용 부담기준 등에 관한 규정 제9조).
- 2) 피해 정도(전파, 반파, 침수)에 따라 차등 지급한다(자연재난 구호 및 복구비용 부담기준 등에 관한 규정 제9조).
- 3) 서울시 내에 기상관측소를 기본으로 IDW를 실행하였으나 결과 값이 서울시 전체를 포괄하고 있지 않거나 누락된 자료는 근처 경기도 지역의 관측소를 포함해 IDW를 실행하였다.
- 4) 고유값(eigenvalue)은 각 자료와 해당 요인 간 상관관계 계수를 의미하는 요인 적재 값의 제곱의 합으로 설명하며, 이 값이 크다는 것은 그 요인이 변수들의 분산을 잘 설명함을 의미한다(김보경 등, 2011).
- 5) 분류(Classification) 기법 중 하나이다. 분류 시 동일한 데이터 수를 고려하여 분류한다.
- 6) AIC는 모형의 설명력을 나타내는 척도이다. Number of Fisher Scoring iterations는 최종모형으로 수렴할 때까지의 반복횟수를 의미한다.

文 獻

- 강정은·이명진, 2012, “퍼지모형과 GIS를 활용한 기후변화 홍수취약성 평가 - 서울시 사례를 중심으로 -,” 한국지리정보학회 15(3): 119-136.
<https://doi.org/10.11108/kagis.2012.15.3.119>
- 강정은·이명진, 2015, “인공신경망을 활용한 서울시 도시기반시설 침수위험지역 분석,” 한국지리정보학회지 35(4): 997-1006.
- 강현웅, 2015, 기후변화를 고려한 도시지역의 도시홍수취약성 평가에 관한 연구, 서울시립대학교.
- 강현철, 2013, “구성타당도 평가에 있어서 요인분석의 활용,” 대한간호학회지 43(5): 587-594.
- 고태규·이원영, 2012, “서울시 수해사례로 본 유역권계획의 필요성,” 도시정책연구 3(2): 57-72.
- 곽한빈·이우균·이시영·원명수·구교상·이병두·이명보, 2010, “우리나라 산불발생의 원인별 공간적 특성 분석,” 한국임학회지 99(3): 259-266.
- 김보경·장대원·장남·양동민, 2011, “기후변화를 고려한 도시홍수 위험요인 도출,” 한국위기관리논집 7(1): 125-142.
- 김윤중·이석민·김태화, 2002, 서울시 상습침수지역관리시스템 구축방안, 서울시.
- 김지수·성효현·최광용, 2013, “도시 홍수 취약성의 공간적 분포 - 서울 지역을 중심으로,” 한국지역지리학회지 19(4): 615-626.
- 남서정, 2011, “저산지 곡부 습지의 지형적 특성,” 지리학논총 (57): 1-19.
- 박무중·박민규·송영석, 2011, Analysis of Spatially Distributed Risk for Regional Disaster Management: 1. Hazard and Exposure, *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation* 11(4): 189-199.
- 박민규·송영석·김상단·박무중, 2012, “수해취약성인자를 이용한 고위험 도시침수지역의 평가기법에 대한 연구,” 한국방재학회논문집 12(2): 245-253.
- 박성천·노경범·이용희·양동현, 2011, 지식천유역 침수실적조사 및 침수예상지도 작성, 한국수자원학회, 297-301.
- 박수진, 2004, “생태환경 특성 파악을 위한 지형분류기법의 개발,” 대한지리학회 39(4): 495-513.
- 성장현·백희정·강현석·김영오, 2012, “서울 지역의 미래홍수취약도 평가,” 한국습지학회지 14(3), 341-352.
- 소방방재청, 2012, 재해연보 2011, 서울시.
- 신상영, 2011, 토지이용특성과 침수피해지역 간의 관계연구, 서울시정개발원.
- 신상영·박찬열, 2014, “토지이용 특성과 침수피해면적 간의 관계 분석: 서울시를 사례로,” 국토연구 81: 3-20.
- 심우배·왕광익·이범현·이문원·문채, 2008, 재해에 안전한 도시조성을 위한 방재도시계획 수립방안 연구, 경기도 안양시.
- 심준석·김지숙·이성호, 2014, “지리가중회귀모델을 이용한 도시홍수 피해지역의 지역적 공간특성 분석,” 환경영향평가 23(1): 39-50.
- 국토연구원, 2008, 우리나라 도시침수피해 특성과 정책과제, 국토연구원.
- 운용남, 2009, “물 관련 재해 대처를 위한 기후변화 적응대책,” K-water 42(9): 59-67.
- 윤중석·백종인·반영운, 2013, “홍수 발생 전 후 피해원인 및 결과에 영향을 미치는 도시 사회 경제적 인자 분석,” 한국지역개발학회, 259-274.
- 이상은·김창현·박태선·김미은·김슬예·이태삼·김진현, 2016, 도시 침수지역 및 영향권 분석을 통한 재난안전 정책지원 시스템 구현(I), 국토연구원, 안양시.
- 이현중·류성현·원상호·조은주·김승욱·조기훈, 2016, “침수피해 영향인자 분석을 통한 호우침수위험도 예측 모델 연구,” 한국방재학회논문집 16(3): 39-45.
- 자연재난 구호 및 복구비용 부담기준 등에 관한 규정 제9조.
- 최충익, 2003, “도시적 토지이용의 변화가 도시의 자연재해 취약성에 미치는 영향에 관한 연구 - 경기도를 사례로,” 국토계획 38(2): 35-48.
- 최충익, 2004, “수도권 도시지역 자연재해 유발요인에 관한 실증연구,” 한국지역개발학회지 16(4): 23-49.
- 최충익, 2013a, “포아송 분포를 활용한 지역 위험도 분석과 함의,” *Korea Planning Association* 48(5): 319-331,

- <http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE02282264>
최충익, 2013b, “현대 서울의 재난·재해 발생 특성에 관한 역사적 연구,” 한국지역개발학회지 25(1): 159-182.
- Dixon, P. M., 2002, Ripley’s K function, *Encyclopedia of Environmetrics*, 1796-1803, <https://doi.org/10.1002/9780470057339.var046>
- Evans, I. S., & Cox, N. J., 1999, Relations between land surface properties: Altitude, slope and curvature, *Lecture Notes in Earth Sciences* 78, <https://doi.org/10.1007/BFb0009718>
- IPCC, 2014, 기후변화 2014 제5차 종합보고서, <https://doi.org/10.1360/N972014-00516>
- Jongman, B., Kreibich, H., Apel, H., Barredo, J. I., Bates, P. D., Feyen, L., ... Ward, P. J., 2012, Comparative flood damage model assessment: Towards a European approach, *Natural Hazards and Earth System Science* 12(12): 3733-3752, <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3733-2012>
- Kuhn, M., Caret: Classification and regression training. UK: R Package.
- Ripley, B.D., 1976, The Second-Order Analysis of Stationary Point Processes, *Journal of Applied Probability* 13: 255-266.

접 수 2018년 4월 30일
최종수정 2018년 6월 5일
게재확정 2018년 6월 15일