

베이지안 확률통계와 GIS를 연계한 기후변화 도시홍수 리스크 평가: 서울시 서초구를 대상으로*

이상혁¹ · 강정은^{1*} · 박창석²

Urban Flood Risk Assessment Considering Climate Change Using Bayesian Probability Statistics and GIS : A Case Study from Seocho-Gu, Seoul*

Sang-Hyeok LEE¹ · Jung-Eun KANG^{1*} · Chang-Sug PARK²

요 약

본 연구는 기후변화에 따른 도시홍수 리스크 평가를 위해 베이지안 확률통계 모형과 GIS를 연계 활용하였다. 리스크는 재난발생가능성과 영향 크기의 곱으로 평가될 수 있다. 본 연구는 베이지안 모형을 기반으로 침수발생가능성을 추정하였고, 기후변화 시나리오 정보를 반영하여 미래 침수 발생가능성도 평가하였다. 침수로 발생할 수 있는 영향은 인명피해와 재산피해의 측면에서 살펴보았다. 서울시 서초구를 대상으로 분석한 결과, 현재 침수발생가능성은 하천에 인접하고, 주변지역보다 고도가 낮으며 불투수면 밀집지역인 서초동, 반포동 일대가 높게 나타났다. 미래 침수발생가능성 추정결과, 2050년의 위험지역 면적이 2030년보다 1.3배 증가하는 것으로 나타났다. 추정된 발생가능성을 활용한 리스크 평가 결과, 인명피해 리스크는 일반 및 고층 주거지역을 중심으로 높은 리스크를 보인 반면, 재산피해는 상업지역을 중심으로 리스크가 높게 나타났다. 2050년의 재산피해 리스크는 2030년의 재산피해 리스크보다 약 6.6% 증가하는 것으로 평가되었다. 본 연구에서 제안된 도시홍수 리스크 평가 기법은 상세한 공간결과 값의 제공으로 지역맞춤형 재해저감 전략을 위한 중요한 의사결정 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

주요어 : 리스크 평가, 도시홍수, 베이지안 확률통계, 기후변화

ABSTRACT

This study assessed urban flood risk using a Bayesian probability statistical

2016년 7월 19일 접수 Received on July 19, 2016 / 2016년 9월 27일 수정 Revised on September 27, 2016 / 2016년 10월 18일 심사완료 Accepted on October 18, 2016

* 본 연구는 2016년 "Brain Busan(BB) 사업" 과 환경부 "기후변화 대응 환경기술개발사업(2014001310006)" 의 지원을 받아 수행되었음.

1 부산대학교 도시공학과 Dept. of Urban Engineering, Pusan National University

2 한국환경정책·평가연구원 Korea Environment Institute

* Corresponding Author E-mail : jekang@pusan.ac.kr

method and GIS incorporating a climate change scenario. Risk is assessed based on a combination of hazard probability and its consequences, the degree of impact. Flood probability was calculated on the basis of a Bayesian model and future flood occurrence likelihoods were estimated using climate change scenario data. The flood impacts include human and property damage. Focusing on Seocho-gu, Seoul, the findings are as follows. Current flood probability is high in areas near rivers, as well as low lying and impervious areas, such as Seocho-dong and Banpo-dong. Flood risk areas are predicted to increase by a multiple of 1.3 from 2030 to 2050. Risk assessment results generally show that human risk is relatively high in high-rise residential zones, whereas property risk is high in commercial zones. The magnitude of property damage risk for 2050 increased by 6.6% compared to 2030. The proposed flood risk assessment method provides detailed spatial results that will contribute to decision making for disaster mitigation.

KEYWORDS : Risk Assessment, Urban Flooding, Bayesian Probability Statistics, Climate Change

서 론

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)는 제5차 평가보고서를 발간하고, 별다른 온실가스 감축 노력 없이 현재 추세로 온실가스가 배출된다면, 금세기 말에는 지구 평균기온은 3.7℃, 해수면은 63cm 정도 상승할 것으로 전망하였다(IPCC, 2014). 우리나라는 같은 기간 동안 기온이 5.7℃ 상승하여 지구평균을 훨씬 상회할 것으로 예상된다. 특히, 극한 기상현상의 증가와 함께 자연재해의 빈도와 강도도 크게 증가될 것으로 전망되고 있다(KMA, 2012).

우리나라의 경우, 극한 강우에 의한 풍수해 피해가 자연재해의 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 특히 고밀도로 개발된 도시지역에 피해가 집중되고 있다. 도시지역은 콘크리트, 아스팔트 등 불투수면의 비중이 높아 물 순환의 왜곡이 발생하고, 많은 인구와 재산이 집중하여 재난 발생 시 비도시지역에 비해 피해규모가 상대적으로 크게 나타난다(National Urban Disaster Prevention Research Center, 2013). 2010년, 2011년의 연이은 서울 강남지역 침수 피해와 2011년 우면산 산사태, 2009년과 2014년에 발생한 부산지역 홍수 및 침수피해 등은 대표적인 도시지역 풍수해 피해 사례이다.

다양한 과학적인 근거를 기반으로 기후변화와 재해의 증가가 예상되는 바, 이로 인한 피해를 줄이기 위해서는 사전 예방 전략을 수립하고 이행하는 것이 매우 중요하다. 그러나 자원과 예산의 한계 속에서 우선적으로 수행해야 하는 대책을 도출하고 이러한 대책이 적용되어야 하는 지역을 선정하는 과정이 필요하며, 이를 위해서는 우선순위와 연계될 수 있는 평가 결과가 뒷받침되어야 한다. 2007년 발표된 IPCC 제4차 평가보고서에서는 기후변화 취약성 평가를 제안하였고, 국내에서도 이에 따라 취약성을 기후노출, 시스템의 민감도, 적응역량의 함수로 정의하고, 각 요소별 지표를 도출하여 평가를 수행하였다(Yoo and Kim, 2008; Kang and Lee, 2012; NIER and Ministry of Environment, 2012). 그러나 취약성 평가가 지표 선정 상의 문제점, 공간단위 수정 가능성의 문제, 구체적인 정책과 연계시키는 데 어려움 등 다양한 문제점을 나타내고 있으며, 2014년에 발표된 IPCC 제5차 평가보고서는 기후변화 리스크 평가와 관리를 정책 수립의 핵심 기반으로 강조하고 있다(Kim *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2014a). 따라서 최근 국제사회에서는 불확실성이 높은 미래 환경을 고려하고, 정책수립과 연계하기 위한 수단으로 리스크 평가와 관리에 대한 논의를 활발하게 진행하고 있다. 이에 반해 국내에서는 기

후변화 리스크에 대한 개념을 도입하고자 하는 노력은 진행되고 있으나(Kang *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2012; Kim, 2015), 구체적인 평가 방법론에 대한 논의는 아직 미흡한 실정이다.

일반적으로 리스크 평가는 리스크에 해당하는 재난의 발생가능성과 그 결과(영향의 크기 또는 피해정도)의 곱(UNDP, 2005; KATS, 2008; Smith, 2013)으로 나타내어지므로, 리스크 평가에 있어 해당 리스크의 발생가능성을 어떻게 계산하고, 어떠한 영향을 고려하는지가 가장 중요한 이슈이다. 본 연구에서는 국내의 대표적인 자연재난으로, 기후변화로 인해 심화될 것으로 예상되는 도시홍수에 초점을 맞추어 기후변화를 고려한 리스크 평가를 수행하고자 한다. 리스크 평가 방식은 홍수 리스크 발생가능성을 정량적으로 평가하고, 공간계획에 활용할 수 있을 정도의 세밀한 분석 결과가 도출될 수 있도록 확률통계모형과 GIS를 연계한 평가방식을 적용하였다.

기후변화를 고려한 홍수 리스크 평가 과정은 다음과 같다. 우선, 선행연구 검토를 통해 기존의 리스크 평가에 대해 살펴보고, 본 연구에서 적용될 리스크 평가 방법론을 선정하였다. 본 연구에서는 과거 침수에 대한 경험과 이에 영향을 미치는 환경·물리적 특성 자료를 활용해 사전분포를 구축하고 사후 확률을 추론하는 베이저안 모델을 기반으로 하는 마르코브 체인 몬테 카를로(Markov Chain Monte Carlo, MCMC) 시뮬레이션 기법을 활용하여 홍수 발생가능성을 추정하였다. 추정된 홍수 발생가능성 결과는 검증을 위해 실제 홍수 발생지역 자료와 비교하는 과정을 거쳤다. 도출된 홍수 발생가능성 분석 결과는 GIS와 연계하여 공간적으로 표현하였으며, 이로 인한 영향은 인명과 재산피해의 측면에서 살펴보고 최종 리스크(발생가능성×영향의 크기)를 평가하였다. 기후변화를 고려하는 만큼 미래 기후변화 시나리오를 활용해 미래 리스크 평가도 함께 수행하여, 현재와 미래의 리스크를 정량적, 공간적으로 비교하고 시사점을 도출하였다.

이론적 고찰

1. 기후변화 리스크 평가

앞서 언급했듯이 2007년 발표된 IPCC 제4차 평가보고서는 정책 마련 및 우선지역 선정의 근거로 기후변화 영향 및 취약성 평가를 강조하였다. 기후변화 영향평가는 기후현상이 자연 또는 인간에 어떠한 영향을 미치는지를 과학적으로 밝히는 데 목적이 있어 정책이나 대책과 연결되기가 어려웠다(Lee *et al.*, 2012). 기후변화 취약성 평가는 취약성을 기후노출, 시스템의 민감도, 적응역량의 세 개념으로 구성하고, 주로 지표를 활용하여 평가를 수행하였다. 평가를 통해 지자체별 취약 분야와 취약지도를 도출하여 어떤 분야와 지역이 상대적으로 취약한지 확인할 수 있었다(Yoo and Kim, 2008; Kang and Lee, 2012; NIER and Ministry of Environment, 2012). 그러나 포함되는 변수, 지표의 표준화 및 통합방식에 따라 결과가 달라지는 등 정확한 평가가 어렵고, 신뢰성 분석이 어려운 문제점이 존재했다(Lissner *et al.*, 2012). 또한 이러한 평가가 주로 시·군·구의 지자체 단위로 이루어져 더 세밀한 공간계획에 반영되기 어려운 단점도 지적되었다(Kang and Lee, 2015).

최근 발표된 IPCC 제5차 평가보고서(2014)는 정책마련의 근거로 리스크 평가를 강조하고, UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change)에서도 2007년 발리행동계획 이후 재난 피해 및 손실을 관리하기 위해 리스크를 탐색하고, 분석하고 평가하여 사전 예방과 연계하려는 노력을 활발하게 진행하고 있다(Park *et al.*, 2014a). 기후변화 리스크 관리는 기후변동과 극한 사상에 대한 현상 해석, 현재의 노력의 한계 검토, 이해당사자의 고려, 불확실성을 다루는데 유용하다(Jones and Preston, 2011). 리스크 관리는 리스크 평가결과를 기반으로 현재 수행중인 정책을 살펴보고 개선하거나 새롭게 추가되어야 하는 정책과 연계시킴으로, 리스크 평가는 리스크 관리를 위한 의사결

정의 핵심 요소라고 할 수 있다. 이러한 리스크 평가를 공간에 적용시킨 경우는 리스크가 높은 지역 및 공간을 도출해내는 과정으로 이해할 수 있다.

리스크의 개념은 연구목적과 분야에 따라 다양하게 해석될 수 있지만 가장 대표적으로 리스크를 어떤 사건의 발생가능성과 부정적인 결과의 곱으로 정의한다(UNDP, 2005; KATS, 2008; Smith, 2013; IPCC, 2014). 국내에서는 리스크를 위험이라는 용어로 해석하여 사용하기도 하지만 본 연구에서는 위험이라고 해석될 수 있는 다른 단어인 “danger”와 구별하고, 국제표준화기구(ISO)에서 사용하는 용어를 그대로 활용하여 리스크로 표현하고 사용하였다. 발생가능성은 발생확률과 함께 사용될 수 있으며, 부정적인 결과는 부정적인 영향의 크기와 규모를 의미한다(Park *et al.*, 2014b). 리스크 평가는 이러한 리스크를 계산하는 과정으로 해당 리스크의 발생가능성을 어떻게 계산하고, 어떠한 영향을 고려하는 지에 따라 다양한 방법론이 적용될 수 있다.

지금까지 이루어진 가장 대표적인 기후변화 리스크 평가는 영국 DEFRA(Department of Environment, Food & Rural Affairs)에서 수행한 것(Climatic change risk Assessment, 2012)으로, 이 평가는 기후변화 부문별로 리스크 목록을 작성하고 주요 리스크를 선별한 후, 전문가 설문조사를 기반으로 정성적인 방법을 활용하여 리스크 평가를 수행하였다. 리스크 평가는 리스크별로 사회적, 경제적, 환경적 측면에서 리스크의 정도를 1~3점으로 평가하고, 발생가능성, 시급성에 대해서도 1~3점으로 평가하는 과정을 거친다. 이러한 DEFRA의 리스크 평가 방식은 국내에도 유사하게 적용되어 국내의 기후변화 리스크가 평가된 바 있다(DEFRA, 2012; Kim, 2015). 이러한 정성적 평가는 농업, 해양, 물관리 등 다양한 부문별 리스크에 대한 일괄적인 평가가 가능한 장점이 있지만, 평가자에 의한 주관성의 개입 등 문제점이 지적되고 있어 최근 정량적 리스크 평가에 대한 관심이 고조되고 있다. 정량적 리스크 평가는 분

야가 다른 리스크에 일괄적으로 적용되기 어려운 측면이 있어 대체로 개별 리스크를 중심으로 평가가 이루어지고 있다.

본 연구에서 초점을 맞추고 있는 도시홍수 리스크의 발생가능성을 정량적, 공간적으로 평가하기 위해서는 몇 가지 접근 방식이 존재한다. 우선, 도시홍수와 관련된 수리·수문모델링 결과를 활용하여 평가를 수행할 수 있다. 모델링을 통한 평가는 주로 좁은 공간인 유역 단위를 공간대상으로 하며, 과거 홍수 이력과 모델 시뮬레이션(강우-유출 시뮬레이션) 자료를 기반으로 SWMM(Storm Water Management Model) 등을 적용하여 유출량을 계산할 수 있다. Bae and Lee(2010)와 Kim *et al.*(2012)은 기후변화 시나리오에 따른 100년 빈도 확률홍수량의 변화와 하천정비사업에 따른 하천 구조변화를 고려한 100년 빈도 홍수위 변화에 대한 평가를 수행하였다. 이때 산정된 유출량과 함께 홍수위와 하수관저설계기준, 유출곡선 등과 같은 구조적 요인을 함께 고려하였다. 이러한 모델링은 상세한 결과를 얻을 수 있는 장점이 있으나, 입력 데이터의 획득이 쉽지 않고, 비용과 자원 등의 문제로 한정된 지역을 대상으로 분석이 주로 수행되며, 도시공간계획 수립에 활용될 수 있는 지자체 전 지역에 대한 분석이 쉽지 않다(Kang and Lee, 2015).

이러한 단점을 보완하고 다양한 리스크에 대해 공통적으로 적용할 수 있는 정량적 방법으로 최근 국외를 중심으로 확률통계 모형이 강조되고 있다. 특히, 불확실성이 높은 기후변화 현상에 대해 넓은 공간을 대상으로 평가를 수행하고자 하는 경우, 확률통계 모형과 GIS의 연계 활용이 시도되고 있다(Gallina *et al.*, 2016). 확률통계 모형을 활용한 평가는 재해 발생에 영향을 미치는 복잡한 요인들을 최대한 고려하여 예측할 수 있다는 장점이 있으며, 재해 발생과 지역특성 요인을 우도비 모형, 로지스틱 또는 비선형 회귀모형 등을 적용하여 평가하고 있다. 국내에서는 확률통계모형을 기반으로 재해 발생에 영향을 미치는 기상요인, 지형적 요인 등 다양한 요인을 고려하여 산사태 재해예측(Kim

et al., 2007)과 홍수 피해액 추정(Lee et al., 2016) 등의 연구가 수행되었다.

최근 유럽에서는 아프리카를 대상으로 기후 변화를 고려한 홍수와 가뭄, 해수면 상승, 사막 화에 대한 재해 발생확률을 베이지안 기법을 활용해 분석하는 연구가 진행되고 있다(CLUVA, 2012). 확률통계적 방법인 베이지안 기법은 모수에 대한 선험적 정보를 활용해 사후 발생가능성을 산출하는 방식으로 사전분포를 활용하여 모수의 불확실성을 고려할 수 있는 방법이다. 이러한 베이지안 기법의 장점 때문에 국내에서는 이를 활용하여 미래 강우를 예측하거나 해수면 상승에 의한 침수발생가능성을 분석한 연구(Park et al., 2014b; Kim and Sung, 2016)가 수행된 바 있다. 그러나 기후변화와 홍수 등의 자연재난에 대한 적용은 아직 부족한 실정이다. 따라서 베이지안 기법 등의 확률통계적 방법론을 기후변화 리스크 평가에 적용 및 실증하는 다양한 연구들이 추가적으로 수행될 필요가 있다.

2. 베이지안 추론

본 연구에서 활용되는 베이지안 추론의 기본적인 과정은 다음과 같다. 관심을 가지는 모수에 대한 이론과 경험 등의 과거자료를 이용하여 사전분포를 설정하고, 관측변수를 정한 후 통계조사 또는 실험을 통해 관측 값을 구축한다. 관심모수가 주어졌을 때 관측 값이 나타날 조건부 확률을 구한 후, 사전분포와 조건부확률로부터 베이즈 정리를 통하여 사후분포를 구하고 추론에 활용한다(Oh, 2012).

베이즈 정리(Bayes' s theorem)는 두 확률 변수의 사전확률과 사후확률 사이의 관계를 나타내며, 베이즈 정리를 통한 확률변수간의 관계를 수식으로 나타내면 (식 1)과 같이 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P(A|B) &= \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \\
 &= \frac{P(A) \cdot P(B|A)}{P(A) \cdot P(B|A) + P(\bar{A}) \cdot P(B|\bar{A})}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

어떤 사건이 발생했을 때 다음 사건이 일어날 가능성을 나타내는 것으로, 식에서 나타나는 $P(A)$ 는 A에 대한 사전확률이며, $P(A|B)$ 는 사건 B에 대한 정보가 주어진 경우에 대한 A의 조건부확률 또는 사후확률이라 한다. 그리고 $P(B)$ 는 사건 B에 대한 사전확률 또는 주변 확률로 한정 상수라 하며, $P(B|A)$ 는 B가 주어졌을 때 A의 우도이다(Downey, 2013). 사전확률은 관측자가 이미 알고 있는 사건으로부터 나온 확률이며, 우도는 알고 있는 사건이 발생했다는 조건 하에서 다른 사건이 발생할 확률이다. 사후확률은 사전확률과 우도를 통해 알게 되는 조건부 확률로 사후확률인 $P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$ 를 직접적으로 구할 수 없는 상황일 때, 사전확률 $P(A)$ 와 우도 $P(B|A)$ 를 이용하여 구할 수 있다.

베이즈 정리를 기반으로 하는 베이지안 추론은 주관적인 사전분포에 대한 비판이 있어왔으나, 도출된 결과에 대한 해석이 용이하고 모호한 결과를 제공하지 않으며 학습에 의한 추론으로, 자연스러운 방법으로 정보를 수정하는 장점을 가지고 있다(Kim, 2013). 또한 최근 통계 계산의 발전으로 비교적 정확한 계산이 가능해 임상실험, 공간역학, 질병지도 등 복잡한 모형을 활용하는 연구에 많이 활용되고 있다(Shin et al., 2012).

본 연구에서 베이지안 추론의 적용은 특정 사건을 홍수로 보고, 사건 발생(홍수발생)에 영향을 미치는 정보인 기후요인과 물리·환경적 요인으로 사전확률을 구축한다. 그 다음 구축된 사전확률을 기반으로 예측하고자 하는 시점의 기후, 물리·환경 정보를 구축하고 베이즈 정리를 활용하여 사건 발생(홍수발생) 확률을 도출하는 것이라 할 수 있다.

본 연구는 베이지안 기법 중 사후분포 추정에 있어 복잡한 확률 분포를 반영하는 난수 생성 및 학습에 효과적인 MCMC(Markov Chain Monte Carlo) 시뮬레이션을 활용한다. MCMC는 앞에서 서술한 분야 외 최근 지구통계학, 공학, 사회과학 등 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 관측된 자료를 조건부 확률에 적용하여

자료가 관측되지 않는 지점의 값을 시뮬레이션하는데도 활용되는 등 반복측정자료 및 군집자료 분석에는 유용하고 안정된 방법이다. 이러한 MCMC 기법은 R, WinBUGS, AMOS 등의 통계 패키지를 통해 분석이 가능해 활용도가 높아졌으며, 본 연구에서는 AMOS를 활용하여 분석하였다.

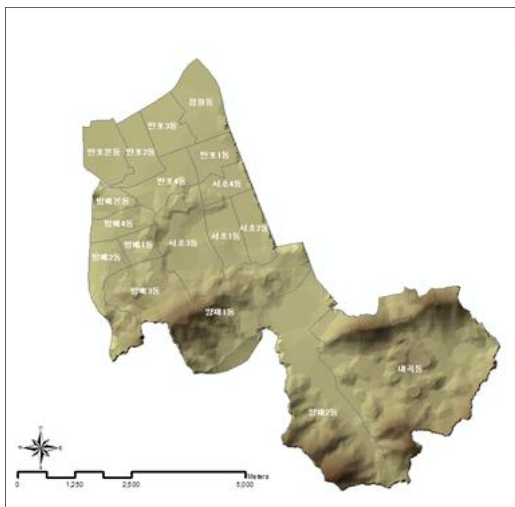
연구 방법

1. 연구 대상지 및 연구과정

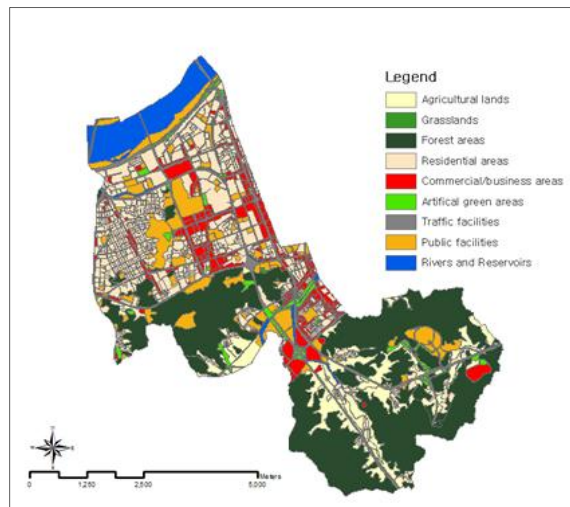
본 연구는 최근 풍수해 피해가 반복해서 발생한 서울시 서초구를 연구대상지로 선정하였다. 서초구는 강남구, 동작구, 관악구와 경기도 과천시와 성남시에 인접하고 있으며, 서울시 정남쪽에 위치하고 있다. 주변 지형은 남쪽으로는 청계산을 주봉으로 우면산, 관악산 등 고지대로 둘러싸여 있으며, 북쪽으로는 한강이 위치하고 있다. 이러한 지리적 특성으로 경사가 급한데 비해 저지대는 완만한 구릉지 형태로 이루어져 호우피해에 취약한 지형이다. 특히, 인근 지역보다 10m 이상 낮은 강남역 일대는 상습침수 지역으로 서울시 특별관리지역으로 분류되어 있으며, 실제로 2011년에는 일 강수 392mm의 집

중호우로 침수와 함께 우면산 산사태가 발생하여 35명의 인명피해와 170억 이상의 재산피해를 경험하였다. 이러한 취약한 지형여건에도 불구하고 이 지역은 2005년 40만 명에서 2014년 45만 명으로 인구가 증가하였으며, 의료시설과 법원 등 주요 시설이 집중된 고도 개발 지역으로 자연재해 발생 시 피해 위험이 큰 지역이다. 현재까지도 반복되는 홍수 및 산사태에 대한 피해를 줄이기 위해 서울시와 서초구에서 다양한 노력들을 기울이는 지역으로 본 연구의 분석 대상지로 선정하였다(그림 1).

본 연구는 (그림 2)와 같이 연구를 진행하였다. 전술하였듯이 리스크 평가는 리스크 발생 가능성과 리스크로 인한 영향의 곱으로 나타낼 수 있다. 먼저, 발생가능성에 대한 분석을 위해 선행연구를 기반으로 침수발생에 영향을 미치는 기상·지형·개발관련 변수를 선정하였다. 선정된 변수 데이터는 GIS와 DB소프트웨어를 통해 가공하고, 베이지안 추론을 통한 침수발생 가능성 분석에 활용하였다. 침수발생가능성은 과거(2001년~2010년) 침수발생 데이터를 기반으로 추정하여, 결과를 지도화·시각화하였다. 추정된 결과의 유효성 검증을 위해 2011년 실제 침수 발생지역과 비교하여 AUC(Area



(a) Topographical map



(b) Land Use Map

FIGURE 1. Study area(Seocho-gu, Seoul)

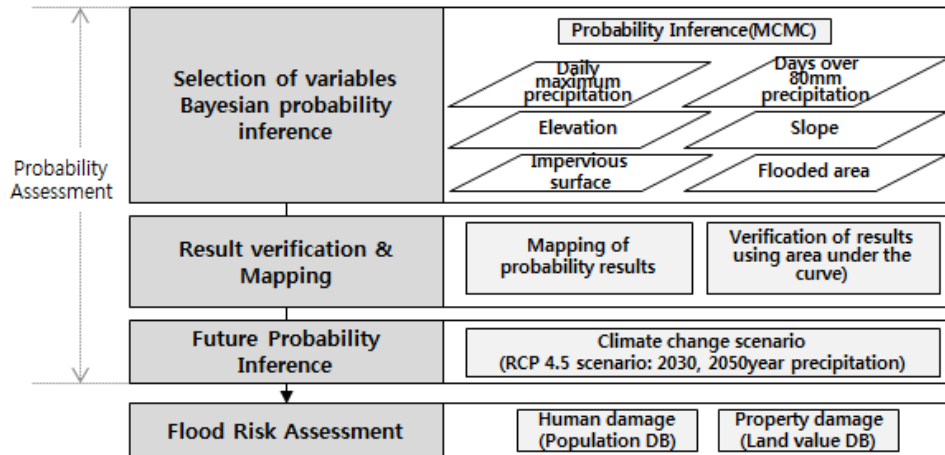


FIGURE 2. Research flow diagram

Under the Curve) 값을 활용하여 검증을 실시하였다. 이후, 기상청에서 제공하는 기후변화 시나리오의 강수량을 활용하여 미래 침수발생 가능성을 추정하였다. 최종적으로, 홍수 발생의 영향이 인명과 재산피해의 측면에서 주로 발생하는 점을 고려하여 인구DB와 공시지가DB를 구축하여 리스크 평가를 실시하였다.

2. 리스크 평가모형

본 연구는 베이지안 기법을 활용하여 홍수리스크의 발생가능성을 평가하였으며, 이러한 리스크의 영향은 인명피해와 재산피해로 구분하여 최종적으로 발생가능성과 영향의 곱으로 인명피해 리스크와 재산피해 리스크가 도출되었다.

본 연구의 홍수리스크 발생가능성 분석은 침수발생이라는 사건에 영향을 미치는 변수를 선정하는 것으로 시작되었다. 이를 위해 홍수 및 침수 취약성 평가 및 유출모형에 관한 선행연구들을 고찰하였다(Bae and Lee, 2010; Son *et al.*, 2011; Kang and Lee, 2012; Kim *et al.*, 2012; NIER and Ministry of Environment, 2012). 관련 선행연구에서 활용한 변수들을 기후노출, 민감도, 적응역량의 세 가지 항목으로 분류하여 일차적으로 정리하였다. 기후노출의 경우 홍수를 유발하는 변수로 강우·강수요인을

일 최대강수량, 일강수량 80mm 이상 일수, 연속 3일 최대강수량, 강우강도, 연평균 강수량 등 평균적인 기후특성과 극한 기후현상을 함께 활용하는 특성을 보였다. 민감도 변수는 발생하는 기후요인에 노출되어 피해에 민감한 정도를 나타낼 수 있는 변수들로 고도, 경사도, 토지이용, 인구특성, 기반시설 등 지역현황변수들을 활용하고 있다. 적응역량은 홍수피해를 저감할 수 있는 변수들로 하천 개수율, 내수배제시설, 녹지면적, 의료시설 등 시설 요인들과 공무원 수, 재해대응대책 유무 등 제도·행정적 요인, 지역의 재정적 자립도, 지역총생산 등 경제적 요인을 포함하여 활용하고 있다.

본 연구에서는 선행연구에서 활용된 변수들을 기상(노출) 변수, 지형관련 변수, 개발관련 변수로 재정리하여, 공간데이터의 활용가능성을 검토하여 최종적으로 표 1과 같이 선정하였다. 기상변수는 강수량과 극한기상을 반영하기 위해 일 최대강수량과 일 강수량 80mm 이상 일수를 활용하였으며, 데이터는 기상청에서 제공되는 지역별상세관측자료(AWS) 가운데 연구지역과 연계되는 5곳(서초, 강남, 남현, 과천, 성남)의 자료를 크리깅(Kriging) 공간보간법을 활용하여 공간자료로 구축하였다. 지형변수로는 물의 흐름 및 합류 지점에 영향을 미치는 고도와 경사도가 주요한 변수로 선정되었다. 또한 도시

TABLE 1. Variables for flood probability and risk assessments

Classification		Variable	Type	Source
Flood probability	Dependent variable	Flood	Map of flooded areas	Discrete data City of Seoul
	Independent variable	Exposure Factors	Daily maximum precipitation	Continuous data Korea Meteorological Administration
Days over 80mm precipitation			Continuous data Korea Meteorological Administration	
Topographic factors		Elevation	Continuous data National Geographic Information Institute	
		Slope	Continuous data	
Development factor		Impervious surface area	Discrete data Water Resources Management Information System	
Impact variable	Inventory Factor	Population by census output area	Continuous data Statistical Geographic Information System	
		Appraised land value	Continuous data City of Seoul	

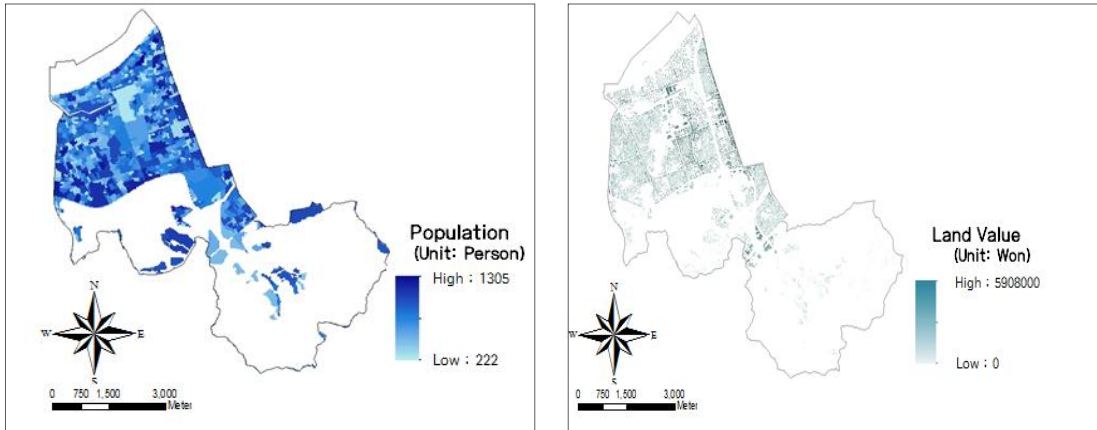
지역의 침수는 표면에 흐르는 유출수에 의한 영향이 크므로 토양의 배수능력에 영향을 미치는 불투수지역이 주요 변수로 선정되고 데이터가 구축되었다.

침수흔적도는 침수발생이라는 사건의 발생가능성 분석을 위한 선험적 정보를 제공하는 기초변수로, 연구대상지역에서 침수가 발생했던 2001, 2003, 2010년 자료를 수집·가공하여 활용하였다. 2011년 침수흔적 자료는 침수발생가능성 예측자료의 검증용을 위해서 사용되었다. 분석에 사용된 모든 자료는 침수흔적 자료와 일치되는 시점의 자료들로 구축되었고, 기반시설계획이나 공원녹지계획 등 도시공간계획에 활용될 수 있을 정도의 해상도인 30×30m의 래스터 데이터로 구축되었다(Kang and Lee, 2015).

미래 기후변화로 인한 홍수 발생가능성의 변화를 살펴보기 위해 기후변화 시나리오 자료가 활용되었다. 기후변화 시나리오는 인류에 일어날 수 있는 기후변화의 잠재적 영향을 알고자 구성된 미래 기후에 대한 가정적 표현이다(KMA, 2010). IPCC 5차 평가보고서를 위해 기상청에서는 대표 농도경로(RCP: Representative Concentration Pathway) 시나리오를 발표하였는데 이 시나리오 오는 기후변화 대응정책에 따라 온실가스 농도가 달라지는 것을 반영하여 네 가지 대표 농도

(2.6, 4.5, 6.5, 8.5)를 설정한다. 대표 농도의 숫자가 높을수록 온실가스 농도가 높아지고 미래의 기후변화가 심화되는 것을 나타낸다. RCP 2.6은 이산화탄소 농도가 420ppm인 경우로 지금부터 즉시 온실가스 감축을 수행한 경우이고, RCP 4.5는 이산화탄소 농도가 540ppm으로 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우, RCP 6.5는 이산화탄소 농도가 670ppm으로 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우, RCP 8.5는 이산화탄소 농도가 940ppm으로 현재 추세로 온실가스가 계속 배출되는 경우를 나타낸다(IPCC, 2014). 본 연구에서는 불확실성이 높은 기후변화 리스크의 과대 추정을 막고 우리나라의 온실가스 저감 목표 및 정책을 고려하여, RCP 4.5 시나리오의 강수량 정보를 활용하여 2030년과 2050년의 미래 침수발생가능성 변화를 분석하였다.

집계구 인구와 공시지가는 리스크 평가에서 피해발생영향을 나타내기 위한 인벤토리 자료로 선정되었다. 인명피해영향을 살펴보기 위해 센서스의 가장 작은 단위인 집계구 단위로 초기 인구 DB(2010년 기준)를 구축하고, 인구가 실제로 거주하는 도시지역에 대해 용도지역을 고려하여 30×30m 셀별 인구 DB가 구축되었다(그림 3(a)). 재산피해영향을 살펴보기 위해



(a) Population by census output area(urban area)

(b) Appraised land value

FIGURE 3. Inventory data for damage impact assessment

서초구 공시지가(2010년 기준)를 활용하였으며, 공간적으로는 지번도 또는 지적도 데이터 활용의 한계로 서초구에 위치한 건물데이터와 공시지가를 매칭하여 재산피해 DB를 구축하여 활용하였다(그림 3(b)).

연구의 결과

1. 침수발생가능성 추정결과

침수발생가능성 추정을 위해 선정된 변수를 바탕으로 베이저안 추론 과정을 거쳐 식 2의 모형이 구축되었다. 침수발생가능성 추정 모형은 사후예측 p값(posterior predictive p value)을 통해 모형의 적합성을 확인하였고, 모형에서 고려된 변수들도 침수발생가능성에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 침수발생가능성에는 고도와 경사도는 음의 영향을 나타내었으며, 노출(기후)변수인 일 최대강수량과 일 강수량 80mm 이상 일수와 개발관련 변수인 불투수면적은 양의 영향으로 나타내는 것으로 나타났다. 변수들 가운데 상대적으로 일 최대강수량이 침수발생가능성에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

$$Y_i = 0.101X_{i1} + 0.046X_{i2} + 0.042X_{i3} - 0.094X_{i4} - 0.054X_{i5} + e \quad (2)$$

Y_i : Flood Probability

X_1 : Daily Maximum Precipitation

X_2 : Days Over 80mm Precipitation

X_3 : Impervious Surface Area

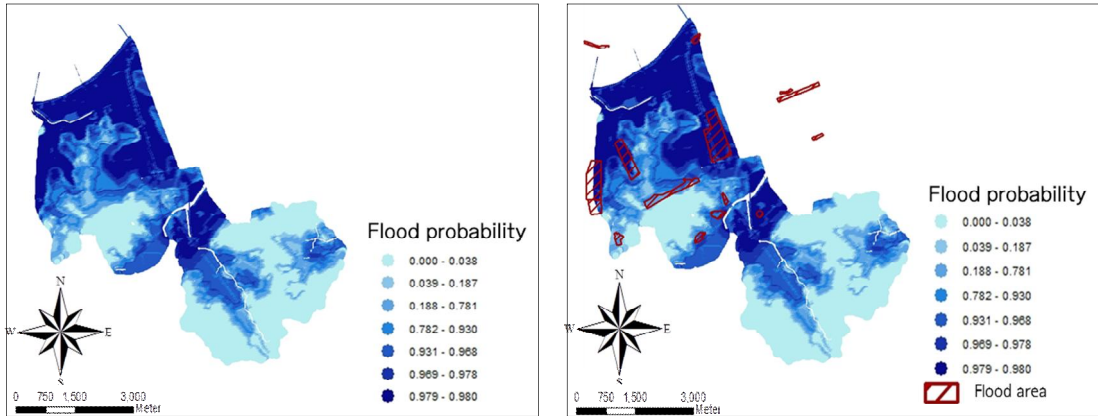
X_4 : Elevation

X_5 : Slope

e : Constant(-0.045)

발생가능성 결과인 그림 4의 (a)는 과거 침수피해의 사전분포정보를 바탕으로 베이저안 추론을 통해 침수발생가능성을 산정하여 지도화한 도면이다. 발생가능성이 높아질수록 짙게 나타나도록 분류하여 표시하였다.

지도를 살펴보면, 침수발생가능성은 임야 및 논·밭을 제외한 주거·상업·업무지구 등 불투수지역과, 고도가 낮은 저지대 및 하천주변에서 높은 발생확률을 보인다. 서초구의 서측과 남측의 투수지역이면서 고도가 높은 산지와 그 주변 지역에서는 낮은 침수발생가능성을 보인 반면, 하천에 인접한 저지대와 고밀주거와 및 상업지구가 몰려있는 북측에서 높은 침수발생가능성이 나타났다. 행정구역 단위로는 방배3동과 서초3동의 남쪽 일부 지역과 인릉산, 구룡



(a) Flood probability (b) Overlay with flooded area of 2011
 FIGURE 4. Flood probability map

산, 대도산으로 둘러싸인 내곡동 지역은 상대적으로 낮은 침수발생가능성을 나타내고 있다. 한강에 인접하고 있으며, 공원 일부를 제외하고 주거와 상업지역으로 이루어진 반포동과 반복 침수 피해를 겪은 강남역을 포함한 강남구와 인접한 서초동 전반에서 높은 피해 발생가능성이 나타났다. 또한 주변지역보다 상대적으로 저지대에 위치하는 양재동에서도 침수위험이 높은 것으로 나타났다. 침수발생가능성을 7단계로 구분하여 살펴볼 때, 침수위험이 매우 높은 지역은 전체 면적의 약 20.07%인 9.67km²를 차지하고 있는 것으로 나타났으며, 침수 가능성이 가장 낮은 지역은 12.61km²로 전체 면적의 약 26.28%를 나타냈다.

그림 4(b)는 추정된 결과 값의 검증을 위해 홍수 발생가능성 결과와 실제 2011년에 발생한 침수지역 흔적도를 중첩하여 살펴보았다. 그 결과, 실제 침수지역이 상대적으로 높은 발생가능성을 나타내는 짙은 부분에 대체적으로 위치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 중첩결과에서 침수발생확률이 다소 낮은 지역에서도 실제침수가 발생한 경우가 나타나고 있어 이를 보다 상세히 살펴보았다. 이 지역들은 2011년에 발생한 우면산 산사태와 연계된 피해지역으로 확인되며, 본 연구의 모형이 주로 홍수에 의한 침수발생에 영향을 미치는 변수만을 고려하였으

므로 해당지역에서는 침수발생확률 추정 값이 낮게 나타났으나 실제로는 산사태와 연계한 침수가 발생했던 것으로 확인되었다.

추정결과에 대한 유효성을 정량적으로 검증하기 위해 ROC(Receiver Operating Characteristic) 곡선의 아래 면적을 활용한 AUC(Area Under the Curve) 값을 분석하였다. ROC 곡선은 검증결과를 보여주는 그래프로 결과 값의 민감도(Sensitivity)와 특이도(Specificity)를 동시에 나타낸다. y축인 민감도(Sensitivity=True Positive Rate)는 예측이 참일 확률을 의미하며, x축은 1-특이도(False Positive Rate=1-Specificity), 즉 예측이 맞지 않을 확률로 이루어진다. 예측이 참일 확률이 높을수록, 예측이 거짓 확률이 낮을수록 모형의 성능이 좋은 것이므로 그래프가 왼쪽 꼭대기에 가깝게 그려질수록 모형의 성능이 우수하다고 본다. 이러한 ROC 곡선 아래의 면적을 AUC라고 하며, AUC의 값이 높다는 것은 예측의 정확도가 높음을 나타낸다(Kang and Lee, 2015). 즉, 1의 값에 가까울수록 결과의 정확성이 높다고 할 수 있다. 본 연구의 베이지안 추론을 활용한 침수발생가능성의 AUC는 0.745로 약 74.5%의 정확도를 나타내며(그림 5 참고), 이러한 검증결과는 베이지안 확률통계 모형을 활용한 침수발생가능성 추정의 신뢰도가 상당히 높음을 의미한다.

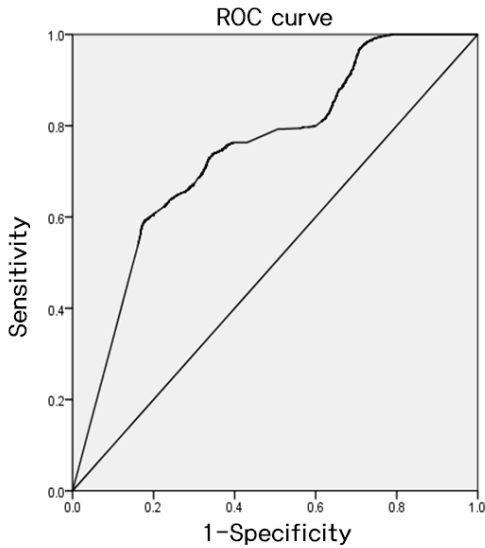


FIGURE 5. Verification of flood probability (Area Under the Curve : 0.745)

기후변화에 따른 침수발생가능성의 변화를 살펴보기 위해 기상청의 기후변화 시나리오를 활용하여 2030년과 2050년 침수발생가능성을 도출하였다. RCP 4.5 시나리오에 따른 강수량은 2050년에는 현재보다 약 13% 증가하는 것으로 나타나며, 증가하는 강수량 데이터를 활용하여 분석한 결과는 그림 6과 같이 나타난다.

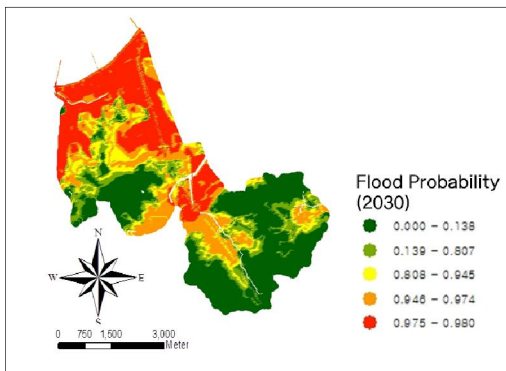
발생가능성을 5단계(매우 적음, 적음, 보통,

높음, 매우 높음)로 구분했을 때 2030년의 보통 및 높음 수준에 있는 지역이 2050년에 매우 높음 등급으로 변화하는 경우가 많음을 확인할 수 있었다. 면적으로 살펴보면 2050년 침수발생가능성의 가장 높음 등급 지역은 2030년 동일 등급 지역 면적(10.16km²)의 약 1.4배 증가하여 24.67km² 정도인 것으로 나타났다.

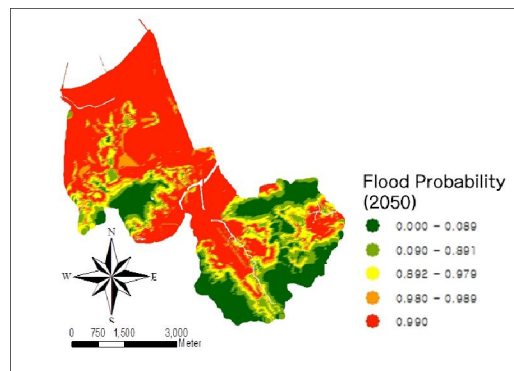
2. 리스크 평가

인명에 대한 리스크 평가는 일차적으로 분석한 침수발생가능성과 인구자료를 곱하는 계산 과정을 거쳐 분석하였다. 연도별 비교를 위해 RCP 4.5 기준 2030년, 2050년의 발생가능성을 활용하였으며, 인구자료는 2010년 자료가 그대로 유지된다고 가정하였다.

인명피해 리스크는 홍수발생가능성이 높은 지역 중 인구밀도가 높은 일반·고층 주택지에서는 높게 나타나며, 이에 반해 상업지역 및 공업지에서는 낮은 인구밀도로 인해 상대적으로 리스크가 낮게 나타나고 있다. 기후 시나리오를 반영한 결과, 2030년에 리스크 최댓값이 188.16에서 2050년도에는 190.08로 증가되었으며, 서초구 전체의 인명피해 리스크가 높아짐을 확인할 수 있다. 공간적으로는 전체적인 패턴은 유사하나, 그림 7(b)에 나타난 방배3동과 양재1동 일부 지역과 같이 새로운 위험지역이 나타

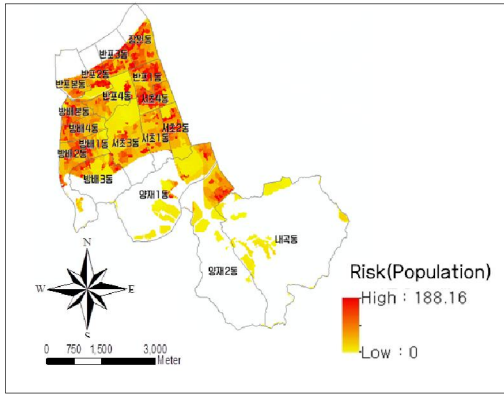


(a) Flood probability (2030 year)

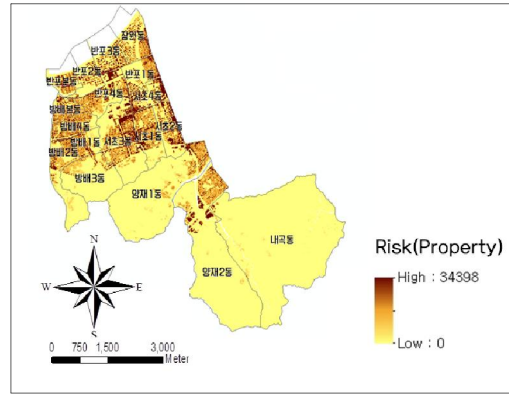


(b) Flood probability (2050 year)

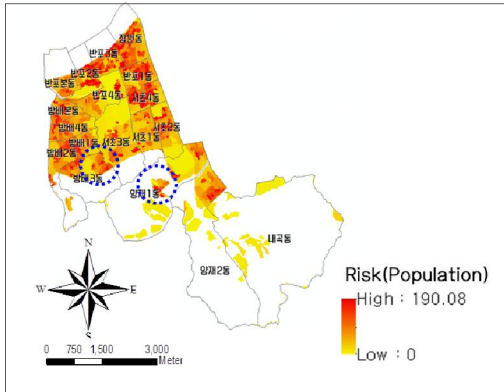
FIGURE 6. Flood probability applied by climate change scenario



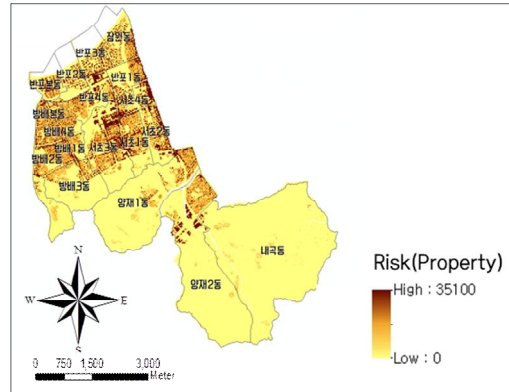
(a) Risk assessment on population (2030 year)



(a') Risk assessment on property damage (2030 year)



(b) Risk assessment on population (2050 year)



(b') Risk assessment on property damage (2050 year)

FIGURE 7. Flood risk assessment

나기도 했다. 홍수로 인한 인명피해의 위험이 높은 지역에 대해서는 빗물펌프, 하수관거 용량 개선 등 구조적 대책 뿐 아니라 홍수 발생 시 주민들에게 최대한 빨리 재해정보를 전달하고 대피할 수 있는 교육과 훈련을 우선적으로 실시하는 등 맞춤형 대책이 마련되어 우선적으로 적용될 필요가 있다.

재산피해 리스크는 발생확률과 공시지가 수치를 곱하여 계산하고, 리스크 규모 및 공간분포를 살펴보았다. 재산피해 리스크는 침수발생 확률이 높은 지역 가운데에서도 상대적으로 지가가 높은 상업지역의 리스크가 높게 나타났다

(그림 7). 재산피해도 인구피해 리스크 결과와 유사하게 시간의 흐름에 따라 리스크 값이 증가하는 경향을 볼 수 있었다. 증가 경향을 수치적으로 살펴보면, 2050년 재산피해 리스크는 2030년 재산피해 리스크(3,124,356)의 약 6.6% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 기후변화 시나리오에 따른 침수발생가능성의 증가가 직접적으로 영향을 미친 것으로 해석된다. 홍수로 인한 재산피해의 위험이 높은 지역은 빗물펌프, 하수관거 용량 개선, 저류지 설치 등 구조적 대책 뿐 아니라 방수관 설치, 내수재료 사용 등을 통한 건축물 강화 전략, 홍

수 보험가입 등 다양한 형태의 전략을 우선적으로 시행할 수 있도록 제안할 필요가 있다.

결론 및 고찰

본 연구는 국내의 주요 자연재난인 홍수를 대상으로 베이지안 확률통계 모형과 GIS를 연계하여 리스크 발생가능성을 추정하였다. 또한 RCP 4.5 기후변화 시나리오를 적용하여 2030년, 2050년 미래 침수발생가능성을 추정하고, 결과 값을 활용해 서울시 서초구에 대한 도시 홍수 리스크 평가를 수행하였다.

베이지안 모델을 기반으로 마르코브 체인 몬테 카를로(Markov Chain Monte Carlo, MCMC) 시뮬레이션 기법을 활용하여 침수발생가능성 추정결과, 주거·상업·업무지구 등 불투수 면적이 높은 지역과 저지대 및 하천주변에서 높은 발생확률이 나타났다. 추정된 결과 값의 검증에 위해 AUC(Area Under the Curve) 방법을 활용하였으며 약 74.5%의 정확도를 나타내는 것으로 나타났다.

미래 침수발생가능성 추정 결과, 시간이 흐름에 따라 증가하는 예측 강수량으로 인해 침수 발생가능성과 위험지역이 점차적으로 증가함을 보였다. 리스크는 인명피해와 재산피해로 분류하여 인벤토리 DB를 구축하고, 추정된 발생가능성과의 곱을 통해 평가하였다. 피해발생가능성이 높은 지역 가운데에서도 인명피해는 일반 및 고층 주거지역을 중심으로, 재산피해는 상업지역을 중심으로 리스크가 상당히 높게 나타나고 있었다. 2050년의 재산피해 리스크는 2030년의 재산피해 리스크보다 약 6.6% 증가하는 것으로 평가되었다.

본 연구에서 적용한 확률통계모형과 GIS를 연계한 침수발생가능성 추정은 기후변화 뿐 아니라 다양한 요인으로 인해 발생하는 불확실성을 고려할 수 있으며, 차후 영향을 끼치는 변수의 추가 분석이 용이한 장점이 있었다. 이를 활용한 리스크 평가는 기존의 지자체별 지표를 활용한 취약성 분석에 비해 공간적으로 좀 더 상세한 결과 값을 가질 뿐 아니라 통계적으로

도 검증 가능한 결과를 제공한다는 장점이 있음을 확인하였다. 본 연구의 결과는 해당지역의 리스크 특성을 고려한 맞춤형 재해 저감 전략 마련의 근거자료로 활용될 수 있을 뿐 아니라, 기존의 방법론을 한 단계 개선했다는 측면에서 의의가 높다고 생각된다.

그러나 본 연구에서 추정한 침수발생가능성은 기후 및 지형요인, 개발요인들을 주요 변수로 산정하였으므로, 배수시설 및 방재시설과 같은 요인과 사회·경제적인 부분까지는 고려되지 못하고 있다. 또한 미래 리스크 평가 시 기후노출 변수의 변화만을 시나리오를 기반으로 반영하고, 기타 인구분포와 재산분포는 현재의 상태를 가정하고 있는 한계점이 존재한다. 현재까지는 미래의 사회·경제적 변화를 세밀한 공간단위로 살펴볼 수 있는 데이터 자체가 부재하여 이러한 한계점을 보완하기가 어려우나, 본 연구의 결과는 기후변화 시나리오의 적용을 통해 미래 리스크의 변화 정도를 어느 정도 예측할 수 있으므로 리스크 평가의 목적인 사전 예방에 활용할 수 있는 자료로 가치가 있다고 사료된다. 최근 미래 사회경제시나리오에 대한 연구들이 진행되고 있는 바, 추후 이러한 한계점을 보완할 수 있을 것이라 기대한다. 또한 본 연구에서 초점을 맞춘 인명 및 재산 피해 뿐 아니라 취약시설, 취약인구 등 보다 다양한 대상에 대한 리스크 평가 연구도 추가적으로 이루어질 필요가 있으며, 홍수와 같은 단일재난 뿐 아니라 홍수와 함께 발생가능한 산사태와 같은 복합재난을 고려한 리스크 평가가 수행된다면 보다 현실을 제대로 반영할 수 있을 것으로 생각된다. **KAGIS**

REFERENCES

- Bae, D.H. and M.H. Lee. 2010. Flooding vulnerability assessment and case review due to climate change. *Planning and Policy* 2016.6:20-31 (배덕효, 이문환. 2010. 기후변화에 따른 홍수 취약성 평가와 사례분석. *국토* 2016.6:20-31).

- CLUVA(Climat change and urban vulnerability in Africa). 2012. An integrated multi-risk framework considering climate change impacts on African cities. http://www.cluva.eu/CLUVA_publications/CLUVA-Presentations/EGU2012-GarciaEtAl/GARCIA_MultiRisk_Africa.pdf.
- DEFRA(Department of Environment, Food & Rural Affairs). 2012. Climate change risk assessment. pp.25-36.
- Downey, A.B. 2013. Think Bayes: Bayesian Statistics in Python. O'Reilly Media. pp.19-24.
- Gallina, V., S. Torresan, A. Critto, A. Sperotto, T. Glade and A. Marcomini. 2016. A review of multi-risk methodologies for natural hazards: consequences and challenges for a climate change impact assessment. *Journal of Environmental Management* 168:123-132.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. Climate change 2014: synthesis report summary for policymakers. pp.10-16.
- Jones, R. N. and B.L. Preston. 2011. Adaptation and risk management. *WIREs Climate Change* 2:296-308.
- Kang, J.E. and M.J. Lee. 2012. Assessment of flood vulnerability to climate change using fuzzy model and GIS in Seoul. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15(3): 119-136 (강정은, 이명진. 2012. 퍼지모형과 GIS를 활용한 기후변화 홍수취약성 평가 - 서울시 사례를 중심으로. *한국지리정보학회지* 15(3):119-136).
- Kang, J.E. and M.J. Lee. 2015. Analysis of urban infrastructure risk areas to flooding using neural network in Seoul. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 35(4):997-1006 (강정은, 이명진. 2015. 인공신경망을 활용한 서울시 도시 기반시설 침수위험지역 분석. *대한토목학회논문집* 35(4):997-1006).
- Kang, S.Y., K.H. Kim, D.C. Kim, H.S. Y, D.J. Min, and B.C. Suk. 2007. A preliminary study of the global application of HAZUS and ShakeMap for loss estimation from a scenario earthquake in the Korean Peninsula. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 10(1):47-59 (강수영, 김광희, 김동춘, 유해수, 민동주, 석봉출. 2007. 지진재해예측을 위한 HAZUS와 ShakeMap의 한반도에서의 적용가능성 연구. *한국지리정보학회지* 10(1):47-59).
- Kim D.H. 2013. Bayesian statistics using R and WinBUGS. FreeAcademy. pp.55-86. (김달호. 2013. R과 WinBUGS를 이용한 베이지안 통계학. 자유아카데미. 55-86쪽).
- Kim, D.H. 2015. Risk assessment and classification for climate change adaptation: application on the method of climate change risk assessment in the UK. *Journal of Environmental Policy* 14(1):53-83 (김동현. 2015. 기후변화 적응을 위한 리스크 평가 및 유형화: 영국의 정성적 리스크 평가 방법론 적용. *환경정책연구* 14(1):53-83).
- Kim, H.S., G.J. Park, S.D. Kim, M.H. Choi, M.J. Park, and J.Y. Yoon. 2012. Assessment of flood vulnerability considering climate change and large-scale river restoration project. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 12(2):107-113(김환석, 박기정, 김상단, 최민하, 박무중, 윤재영. 2012. 기후변화와 대규모 하천정비 사업을 고려한 낙동강 유역 자연재해 홍수 취약성 평가. *한국방재학회지* 12(2):107-113).

- Kim, J.S., H.Y. Kim, and S.H. Lee. 2014. A review on improvements of climate change vulnerability analysis methods: focusing on sea level rise disasters. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 17(1):50-60 (김지숙, 김호용, 이성호. 2014. 도시 기후변화 재해취약성분석 방법의 개선방안 검토: 해수면상승 재해를 중심으로. *한국지리정보학회지* 17(1): 50-60)
- Kim, J.Y. and S.Y. Sung. 2016. Forecasting possibility of flood occurrence in Suwon under climate change applying stochastic simulation. *Journal of Korea Planning Association* 51(2):255-265 (김지연, 성선용. 확률론적 모의 기법을 활용한 기후변화에 따른 수원시 침수 발생가능성 지도 구축. *대한국토도시계획학회지* 51(2):255-265).
- Kim, K.S., C.O. Lee, Y.S. Song, Y.C. Cho, M.I. Kim, and B.G. Chae. 2007. Analysis of landslide hazard probability for cultural heritage site using landslide prediction map. *The Journal of Engineering Geology* 17(3):411-418 (김경수, 이춘오, 송영석, 조용찬, 김만일, 채병근. 2007. 산사태예측도에 의한 석조문화재 주변의 산사태재해 가능성 분석. *지질공학회지* 17(3):411-418).
- Korean Agency for Technology and Standards (KATS). 2008. KS A ISO PAS 22399. p.7 (국가기술표준원. 2008. 사회안전-사고 대비 및 운영연속성 관리 가이드라인 KS A ISO PAS 22399. 7쪽).
- Korea Meteorological Administration(KMA). 2010. Climate change handbook.(기상청. 2010. 쉽게 이해하고 간편하게 활용하는 기후변화 핸드북).
- Korea Meteorological Administration(KMA). 2012. Report on Korean climate forecasts. p.70 (기상청. 2012. 한반도 기후전망 보고서. 70쪽).
- Lee, J.S., G. Eo, C.H. Choi, J.W. Jung, and H.S. Kim. 2016. Development of rainfall-flood damage estimation function using nonlinear regression equation. *Journal of the Korea Society Disaster Information* 12(1):74-88 (이중소, 어규, 최창현, 정재원, 김형수. 2016. 비선형 회귀식을 이용한 강우-홍수피해액 추정함수 개발. *재난정보학회논문집* 12 (1):74-88).
- Lee, S.J., J.E. Kang, S.J. Myung, D.H. Kim, Y.J. Kim, G.R. Yoon, and J.Y. Seo. 2012. Evaluation of climate change adaptation capacity for national risk management. Korea Environment Institute, Research Report. pp.1-6 (이수재, 강정은, 명수정, 김동현, 김유정, 윤기란, 서지예. 2012. 국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가. *한국환경·정책평가연구원*. 1-6쪽).
- Lissner, T.K., A. Holsten, C. Walther and J.P. Kropp. 2012. Toward sectoral and standardised vulnerability assessments: the example of heatwave impacts on human health. *Climate Change* 112(3):687-708.
- NIER(National Institute of Environmental Research and Ministry of Environment). 2012. Climate change vulnerability map of each impact sector to establish climate change adaptation implementation plan for local governments. pp.7-39 (국립환경과학원, 환경부. 2012. 지자체 기후변화 적응 세부 시행계획 수립 지원을 위한 기후변화 부문별 취약성 지도. 7-39쪽).
- National Urban Disaster Prevention Research Center. 2013. Manual for the analysis of climate change driven disaster vulnerability in urban area. pp.1-2 (국가도시방재연구센터. 2013. 도시기후변화 재해 취약성 분석

- 매뉴얼. 1-2쪽).
- Oh, M.S. 2012. Bayesian statistical inference with R-Monte Carlo. FreeAcademy. pp.201-202. (오만숙. 2012. R몬테카를로와 함께하는 베이지안 통계추론. 자유이카데미. 201-202쪽).
- Park, C.S., Y.I. Song, S.H. Lee, Y.J. Kim, B.S. Byun, J.E. Chae, S.Y. Park, S.Y. Kim, J.A. Kim, M.S. Jung, B.O. Ahn, and E.S. Lee. 2014a. Climate-environmental risks outlook and the national strategy(I). Korea Environment Institute. Research Report. pp.16-18 (박창석, 송영일, 이승환, 김유정, 변병설, 채정은, 박소연, 김수영, 김진아, 정민선, 안병욱, 이은선. 2014. 기후환경 리스크 전망과 국가전략(I). 한국환경·정책평가연구원. 연구보고서. 16-18쪽).
- Park, S.J., D.K. Lee, S.Y. Sung, and T.Y. Jung. 2014b. Risk assessment of potential inundation due to sea level rise using Bayesian Network. Journal of Korea Planning Association 49(2):347-358 (박상진, 이동근, 성선용, 정태용. 2014. Bayesian Network를 이용한 해수면 상승에 따른 잠재적 침수위험 평가. 국토계획 49(2):347-358).
- Shin, Y.N., M.A. Kim, S.W. Lee, M.K. Yoo, H.S. Mun, T.G. Kang, E.J. Lee, J.Y. Hong, E.Y. Hong, and K.H. Kim. 2012. Water quality prediction and assessment using Bayesian linear regression. National Institute of Environmental Research. Research Report. pp.3-5. (신유나, 김미아, 이수용, 유문규, 문현생, 강태구, 이은정, 홍지영, 홍은영, 김경현. 2012. Bayesian 방법에 의한 수질예측 및 수질평가기법 연구. 국립환경과학원 연구보고서. 3-5쪽).
- Smith, K. 2013. Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster 6th edition. Routledge. pp.26-50.
- Son, M.W., J.Y. Sung, E.S. Chung, and K.S. Jun. 2011. Development of flood vulnerability index considering climate change. Journal of Korea Water Resources Association 44(3):231-248 (손민우, 성진영, 정은성, 전경수. 2011. 기후변화를 고려한 홍수취약성지표 개발. 한국수자원학회 논문집 44(3): 231-248).
- UNDP(United Nations Development Programme). 2005. Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policy and measure. USA, Cambridge University Press. p.79.
- Yoo, G.Y. and I.H. Kim. 2008. Development and application of a climate change vulnerability index. Korea Environment Institute. Research Report. p.34 (유가영, 김인애. 2008. 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안. 한국환경정책·평가연구원. 연구보고서. 34쪽). [KAGIS](#)