



도시계획 적용을 위한 도시홍수 취약성 및 리스크 평가*

Urban Flood Vulnerability and Risk Assessments for Applying to Urban Planning

이상혁** · 강정은***

Lee, Sang-hyeok · Kang, Jung Eun

Abstract

This study conducted two flood assessments and compared their methods, procedures, and outcomes for applying to urban planning: a flood vulnerability assessment in accordance with the Climate Change Vulnerability Assessment adopted by the government and a probabilistic risk assessment stressed by IPCC. The flood vulnerability assessment employed the indicator method based on the manual and guidelines. The probabilistic risk was defined as a product of the probability of occurrence and its effect. It used Markov Chain Monte Carlo (MCMC) simulation, which is effective in random number generation and machine learning based on the Bayesian concept. The results of two evaluations focused on Busan show that while spatial distributions of risk areas are quite similar, risk area calculated by flood vulnerability assessment is a little larger than risk assessment due to different units of analysis, used data, and assessment methodology. Risk assessment provides more accurate results, but assessment method is complicated, while vulnerability assessment is easy to use, results cannot be quantitatively validated. Therefore, the combination of vulnerability and risk assessment is considered meaningful as it could improve existing flood assessments and contribute to decision making to establish safer cities.

키 워 드 ■ 도시홍수, 도시계획, 기후변화 취약성 분석, 리스크 평가, MCMC 시뮬레이션

Keywords ■ Urban flood, Urban Planning, Climate Change Vulnerability Assessment, Risk Assessment, MCMC Simulation

I. 연구의 배경 및 목적

기후변화는 기온상승과 함께 강수일수·강수량 증가, 극한기상의 발생 증가 등 다양한 형태로 나타나고 있다. 이에 따라 자연재해의 발생 빈도와 강도, 피해가 급증하고 있다. 실제로 2000년대 자연재해 피해액은 70년대 대비 8.6배, 90년대 대비 2.4배

증가하였으며, 2010년 이후 피해 강도는 더욱 증가하고 있다(국토교통부·국토연구원, 2013).

우리나라의 다양한 자연재해 중 풍수해로 인한 피해는 전체 피해액의 약 90%를 차지하고 있으며(국민안전처, 2015), 도시지역에서 집중적으로 발생하고 있다(국토교통부·국토연구원, 2013). 이는 도시화로 인해 불투수 면적이 증가하면서 물순환의

* 본 논문은 2017년 4월 대한국토·도시계획학회 춘계산학학술대회에서 발표한 논문을 수정·보완한 것이며, 환경부 “기후변화대응 환경기술개발사업(2014001310006)” 및 “기후변화특성화대학원사업”의 지원으로 수행되었습니다.

** Ph.D. Student, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University

*** Associate Professor, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University
(Corresponding author: jekang@pusan.ac.kr)

외곡이 발생하고, 도시지역에 인구와 시설이 집중되면서 홍수 발생 시 노출되는 재산과 인명이 증가하기 때문이다. 대표적으로 2011년 서울지역에 연평균 강수량의 40%에 해당하는 강우가 3일간 집중적으로 내리면서 우면산 산사태와 강남 침수피해가 발생했다. 2014년 부산지역에는 국지적 집중호우로 951억 원에 달하는 침수피해가 발생했으며, 2016년 태풍 ‘차바’는 주택과 연안지역의 침수, 항만시설 및 도로 붕괴 등 2,150억 원의 피해를 일으켰다(국민안전처, 2011, 2014; 행정안전부, 2016).

기상청(2011)의 기후변화 시나리오 전망에 따르면 2020년까지 강우강도 및 강수량은 약 20% 이상, 호우일수는 약 60% 이상 증가할 것으로 예측되고 있다. 이러한 강우강도와 호우일수의 증가는 도시지역의 홍수 및 침수 발생 빈도와 피해규모를 지속적으로 증가시킬 것으로 예상된다. 우리나라의 도시공간은 산업화와 함께 급격하게 도시화되었으나, 토지이용 및 건물 배치, 기반시설 설치 등 도시계획에 방재에 대한 고려가 미흡했다(한국방재학회, 2017). 이와 함께 도시 전반의 물리적 노후화로 재난 발생 시 피해 가능성이 더욱 높아지고 있다.

이에 따라 국토교통부는 「도시계획 수립지침」의 개정을 통해 2012년 7월 이후 수립 및 변경되는 도시계획(광역도시계획, 도시·군기본계획, 도시·군관리계획)에 도시 기후변화 재해취약성 분석을 실시하여 반영하도록 제도화하였다. 2015년 1월에는 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 개정을 통해 재해취약성 분석 결과가 도시계획의 기초자료로 포함되도록 명시하였다. 제도의 빠른 정착을 지원하고, 분석 방법을 교육하기 위해 국토교통부와 국토연구원은 「도시 기후변화 재해취약성 분석 매뉴얼(2013)」과 「도시 기후변화 재해취약성 분석 및 활용에 관한 지침(2016)」을 제작하여 공무원 및 관계자들에게 배포하였다.

현재 도입된 기후변화 재해취약성 분석은

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 제4차 평가보고서(2007)에서 제시된 취약성의 개념을 기반으로 하고 있다. 이 보고서에 따르면 취약성은 재해에 대한 노출(Exposure), 해당 시스템의 민감도(Sensitivity), 적응역량(Adaptive capacity)의 함수로 정의될 수 있다. 취약성 평가는 모델링 분석, 지표, 브레인스토밍 등 다양한 방식으로 이루어질 수 있다(강정은 외, 2012). 국내·외의 많은 선행연구들(유가영·김인애, 2008; 고재경·김희선, 2009; 국립환경과학원·환경부, 2012; Lissner et al., 2011)은 적용과 이해가 쉬운 지표법을 이용하여 취약성을 평가하고 있으며, 기후변화 재해취약성 분석 역시 이러한 흐름에 따라 지표를 선정하여 취약성을 분석하고 있다. 그러나 지표법은 평가 지표 선정의 문제, 가중치, 지표 통합 방법, 공간단위에 따른 분석결과의 차이 등으로 신뢰성 확보와 적용에 어려움을 겪고 있는 것도 사실이다(김지숙 외, 2014). 기후변화 재해취약성 평가가 법적, 제도적 근거를 기반으로 적용되고 있으나, 분석과정에서 문제점과 어려움이 발견되고 있고, 정책과의 연계가 어려운 점들이 존재해 실효성 있는 제도로 안정화되기 위해서는 재해평가의 방법론적 다양화와 개선을 위한 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

최근 발표된 IPCC 제5차 평가보고서(2014)는 기후변화 적응정책 마련의 근거로 기후변화 리스크 평가를 강조하고 있다(박창석 외, 2014; 이상혁 외, 2016). 제4차 보고서가 취약성 평가를 강조했던 것에 비해 리스크 평가는 기후변화라는 불확실한 사상을 다루는데 유리하며, 리스크 평가를 포함한 위험 관리 과정은 정책 및 의사결정 과정에 초점을 맞출 수 있다는 장점이 있다(김동현, 2015; Jones and Preston, 2011).

이에 본 연구는 최근 도시계획 수립을 위해 도입된 도시 기후변화 재해취약성 평가 방법과 새롭게 강조되고 있는 리스크 평가 방법을 주요 자연재

난인 홍수를 대상으로 적용하여, 평가과정과 평가결과를 비교하고자 한다. 이를 기반으로 기후변화 재해평가 방법론의 다양화와 개선방안을 도출하고자 하였다.

II. 이론적 고찰 및 선행연구

1. 취약성과 리스크 개념

취약성과 리스크에 대한 다양한 연구들이 수행되고 있지만 연구자별로 조금씩 다른 개념을 사용하고 있어 본 연구는 주요 연구를 기반으로 개념을 살펴보고, 두 개념 사이의 관계를 정리하였다.

취약성(Vulnerability)은 사전적으로 “무르고 약한 성질이나 특성”이라 정의된다(국립국어원 표준국어대사전). 취약성은 기후변화, 재난·재해, 보건, 생태 등 다양한 분야에서 각각의 의미로 활용되어 통합된 정의를 내리기는 어렵다(UNDP, 2005). 분야별 연구기관 및 단체에서는 취약성의 개념을 조작적으로 정의하고, 이를 바탕으로 연구를 진행하고 있다.

UNDP(United Nations Development Programme, 2005)는 기후변화 취약성을 “기후의 변동이나 스트레스에 대한 노출과 이에 대한 대처, 회복, 적응능력에 따른 노출 수준의 위험에 대한 민감한 정도”로 정의하고 있다. UN/ISDR에서는 “물리, 사회, 경제, 환경적 요인 또는 과정(Process)에 의해 결정되는 조건에 따라 위협의 영향에 대한 지역사회의 민감성을 증가시키는 상황이나 특성”으로 정의하며, UK CIP(UK Climate Impacts Programme)는 특정 위험상황에서 야기되는 손해의 규모로 정의한다(Levina and Tirpak, 2006). IPCC는 취약성을 “기후변화의 역효과에 대한 한 시스템이 영향을 받는 정도 또는 대처하지 못하는 정도”

로 정의하고(IPCC, 2001), 한 지역 또는 시스템의 기후변화 취약성은 기후변화에 노출(Exposure)되어 있는 정도와 그 시스템이 기후변화에 영향을 받는 정도인 민감도(Sensitivity), 기후변화에 적응하고 위험을 완화하는 능력인 적응역량(Adaptive capacity)에 의해 결정된다고 보고 있다(IPCC, 2007). 현재 국내에서 시행되고 있는 도시 기후변화 재해 취약성 평가 제도는 IPCC의 기후변화 취약성 개념을 바탕으로 하고 있다.

취약성 평가 방법은 접근에 따라 상향식과 하향식으로 구분할 수 있으며(Moss et al., 2001), 하향식 접근법은 과학적이고 정량적인 모델링기법을 기반으로 물리적 취약성을 평가하는 방법이다. 상향식은 취약성 개념을 기반으로 주요 지표를 도출하고 이에 대해 통계자료 및 전문가의 판단 등을 활용하여 해당 시스템의 적응능력을 평가하는 사회경제적 접근법(강정은 외, 2012)이다. 선행연구들은 노출, 민감도, 적응역량에 해당하는 지표를 선정하여 취약성 지수를 도출하는 방법을 주로 활용하고 있다.

리스크(Risk)의 사전적 정의는 “해로움이나 손실이 생길 우려가 있거나 그러한 상태, 사회·경제적 부문에서는 어떤 가치에 대한 손실의 잠재성”으로 정의된다(국립국어원 표준국어대사전). 재난·재해 연구에서 리스크는 특정 기간 동안, 특정 장소에서 발생하는 위험요인(Hazard)에 노출된 인간 및 재산의 피해 가능성으로 설명할 수 있다.(Downing et al., 2001; UNDHA, 1992). 따라서, 리스크는 피해를 일으킬 수 있는 위험요인(Hazard), 실제 위험요인에 노출되었을 때 시스템 피해정도에 영향을 미치는 취약성(Vulnerability), 위험요인에 대한 노출(Exposure)의 결과물로 정리할 수 있다(Crichton, 1999; IPCC, 2014; UNESCO-IHE, 2012). 또한, 많은 선행연구(ISO 31010, 2009; Bowering et al., 2014; Smith, 2013; Jones and Boer, 2003; ULI, 2015)는 리스크를 위험요인(Hazard)의 발생확률

(Probability)과 해당 위험요인이 실제 발생했을 때의 결과(Consequence)의 조합으로 정의하기도 한다. 위의 두 개념적 정의는 서로 별개의 개념이 아니라 밀접하게 연관되어 있다. 즉, 위험요인(Hazard)의 발생가능성(Probability)은 위험요인의 자체적 발생 빈도(재현빈도)를 살펴봄으로써 얻을 수 있는 정보이고, 위험요인이 실제로 발생함으로 인한 피해 또는 결과(Consequences)는 해당시스템의 취약성(Vulnerability)과 위험에 대한 노출(Exposure)에 의해 결정된다.

취약성과 리스크 평가 모두 정책수립의 앞 단계에서 현황 및 문제 파악, 정책 수립 우선순위에 대한 정보 제공을 위해 활용될 수 있다. 일반적으로 리스크 평가에서 말하는 취약성은 위험을 증폭시키는 요소로 기후변화 취약성 평가에서 포함하는 시스템의 민감도와 적응역량에 의해서 결정된다. 결과적으로 IPCC에서 제안한 기후변화 취약성 평가는 리스크 평가와 유사한 함수형태를 취하게 되었다. 그러나, 취약성 평가는 취약한 정도에 대한 현황을 살펴보는 것을 주요 목표로 결정론적(deterministic) 결과가 도출된다. 이에 반해 리스크 평가는 위험의 가능성, 잠재성에 초점을 두고 미리 위험을 예측하여 사전에 예방하고자 하는 데 목적을 두고 평가가 수행되며 확률론적(probabilistic) 결과가 표현될 수 있다. 지표법을 주로 사용하는 취약성 평가는 평가가 용이하고 이해하기 쉬운 장점이 있으며, 리스크 평가는 발생가능성과 결과를 각각 평가하므로 발생가능성이 낮더라도 피해가 큰 위험을 고려할 수 있으며, 확률적 결과와 연계하여 불확실성을 고려할 수 있다.

두 평가방식은 평가의도 뿐 아니라, 평가방법과 사용되는 데이터의 종류 및 형태도 차이가 있으므로 평가의 목적을 고려하여 선택적으로 사용될 필요가 있다.

이어지는 절에서는 두 평가의 평가방법론에 대

한 이론적 기반을 상세히 논의하였다.

2. 기후변화 재해취약성 평가

「도시 기후변화 재해취약성 분석 매뉴얼(2013)」과 「도시 기후변화 재해취약성분석 및 활용에 관한 지침(2016)」에는 담당 공무원 및 관련업계 종사자들이 어느 정도 통일된 형태의 평가를 실시할 수 있도록 평가방법이 제시되어 있다. 지침에 따르면 기후변화 재해취약성 평가는 총 6종류의 재해(폭우, 폭설, 폭염, 강풍, 가뭄, 해수면상승) 중 해당 지자체의 특성에 맞는 대상 재해를 선정하고 지표를 활용하여 평가하도록 하고 있다. 이 분석에서 적용되는 취약성의 개념은 전술한 것과 같이 IPCC 기후변화 취약성 분석의 기본 골격을 바탕으로 하고 있다. 실제 분석과정에서 적응능력은 지표선정의 어려움을 들어 배제하고 기후노출과 민감도만을 대상으로 평가를 수행하도록 하고 있다.

평가는 현재 취약성과 미래 취약성을 평가하여 네 개의 취약단계로 구분하여 표시하고, 결과비교를 통해 종합 취약성(안)을 작성(Figure1)하며, 작성된 종합 재해취약성(안)은 전문가 의견수렴을 통해 최종 취약성을 도출하는 과정을 거친다.

기후노출을 위한 지표는 재해별로 유발요인인 기온, 강수량 등 기후적 요소를 포함하고, 도시민감도의 경우 현재 민감도는 최근 10년간 피해지역, 법정위험지역(방재지구, 자연재해위험지구, 산사태 취약지구 등)에 대한 자료를 바탕으로 잠재취약지역 요인과 시민, 도시기반시설 등을 활용한 도시취약구성요인을 지표로 활용한다. 미래 취약성 분석에서는 미래 기후 시나리오를 기반으로 기후노출 지표를 구성하고 도시 민감도는 최근 10년간 시가지지역, 인구증가지역, 도시개발사업 진행·예정지구 정보를 바탕으로 지표를 구성하여 평가하도록 하고 있다.

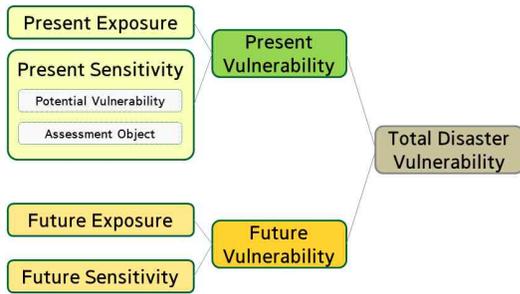


Fig 1. Climate change vulnerability assessment structure

Source: Climate change vulnerability manual, 2012.

재해취약성 평가를 위한 지침은 전반적인 과정에 대해 제시하나, 각 지역별로 지자체 여건과 전문가 의견을 수렴하여 재해유형이나 지표 선정을 할 것을 제안하고 있다.

도시 기후변화 재해취약성 분석 제도는 아직 시행 초기라 관련한 다양한 연구가 수행되지는 않았지만, 제도 정착을 위한 보완책(이병재, 2014)과 분석단위에 따른 분석결과 불일치에 대한 문제점이 지적되고 있으며(김지숙 외, 2014; 홍재주 외, 2015), 추가적으로 다양한 연구를 통해 방법론적 검토와 제도적 정착 방안이 모색될 필요가 있다.

3. 기후변화 재해리스크 평가

선행연구들(Bowering et al., 2014; Smith, 2013; Jones and Boer, 2003; FEMA, 2012; ARMONIA 2007)은 조금씩 다른 방법으로 리스크를 평가하고 있으나 기본적으로는 재해 발생가능성과 결과(피해정도)를 평가하여 곱하거나 매트릭스를 활용하여 비교하는 방식을 많이 활용하고 있다. 리스크 평가 과정은 대체로 위험요소(hazard) 평가, 취약성(vulnerability) 평가, 리스크 평가의 단계로 이루어진다. 위험요소 평가 단계에서는 위험요소의 발생가능성이 산정되며, 취약성 평가에서는 재해에 영향을 받는 대상을 선정하여 재해에 노출된 정도

를 계산하고, 최종적으로 리스크 평가는 함수식이나 매트릭스를 활용하여 최종 리스크를 계산하는 순서로 이루어지고 있다.

가장 대표적인 기후변화 리스크 평가는 영국의 기후변화 리스크 평가(Climate Change Risk Assessment, CCRA)로 국가차원에서 기후변화 리스크 평가가 이루어지고 있다. CCRA는 전문가들이 식별된 리스크에 대한 발생가능성과 결과의 크기(magnitude)를 사회, 경제, 환경적 측면에서 정성적으로 평가하여, 우선적으로 고려해야하는 리스크를 도출하고, 적응정책과 연계하고 있다(DEFRA, 2012; 김동현, 2015).

최근에는 기후변화 리스크를 정량적으로 평가하려는 노력이 다양하게 진행되고 있다. ARMONIA(Applied Multi Risk Mapping of Natural Hazard for Impact Assessment) 연구는 독일, 그리스, 핀란드, 캐나다 등 7개 국가의 연구기관의 공동연구로 유럽지역의 재해를 예방하기 위해 공간계획에 활용될 수 있는 리스크 지도를 만들 고자 재해별 발생가능성을 정량적으로 계산하고, 영향을 받는 요소의 노출정도와 취약성을 고려해 리스크 평가를 수행하고, 공간정보화하고 있다. CLUVA(Climate Change and Urban Vulnerability in Africa)는 아프리카 도시지역을 대상으로 기후변화와 관련된 위험요소와 이에 노출되는 시스템의 취약성을 분석하고 리스크를 산정하는 연구이다. 이 연구는 재해 발생확률 산정을 위해 통계적 기법인 베이지안 접근을 적용하여 재해발생확률을 분석하고, 재해에 노출되어 피해발생가능성이 큰 건축물과 사람을 중첩하여 리스크 평가를 시행하고 있다 (CLUVA, 2012).

리스크 평가와 관련하여 재해발생가능성을 정량적으로 평가하려는 시도들이 다양하게 이루어지고 있다. 과거에는 주로 재해별 모델링을 활용해 발생가능성을 정량적으로 평가하려는 연구(김환석 외,

2012; 박무종 외, 2013; 최현일 외 2013)들이 이루어졌으나, 최근에는 재해에 관계없이 적용할 수 있는 방법론으로 과거 경험데이터를 활용하여 확률·통계 모형을 활용하여 평가하는 시도들이 많이 이루어지고 있다. 확률·통계 모형을 적용한 연구들은 재해발생 현황자료를 기반으로 이에 영향을 미치는 다양한 영향들을 고려하여 빈도비 모형(이명진·강정은, 2012), 인공지능경망 모형(강정은·이명진, 2015), MaxEnt 모형(김효민 외, 2013; 김지연·성선용, 2016), 베이지안 네트워크 모형(박상진 외, 2014; 남기훈, 2014) 등을 활용하여 재해발생 가능성 또는 리스크를 평가하였다.

본 연구는 전문가 설문 중심의 정성적 평가보다는 여러 분야에 복합적으로 적용가능한 정량적인 방법인 확률·통계적 리스크 평가 방법을 적용하고자 하였다. 특히, CLUVA에서 시도한 베이지안 개념을 기반으로 한 MCMC(Markov Chain Monte Carlo)방법의 적용에 주목하였다. 이 방법론은 과거의 경험을 기반으로 사후발생가능성을 추론하는 방법으로 모수의 불확실성을 고려할 수 있을 뿐 아니라 신뢰성 검증이 가능하며, 넓은 지역과 복잡한 요인들을 최대한 고려하여 평가할 수 있다. 또한 GIS와 연계하여 공간계획에 활용할 수 있는 장점이 있다. CLUVA는 현재 리스크 뿐 아니라 IPCC의 기후변화 시나리오인 대표농도경로(RCP, Representative Concentration Pathways)를 반영하여 미래 리스크를 평가하였다. 본 연구에서도 취약성 평가와 리스크 평가 모두 현재와 미래의 예측을 동시에 수행하여 경향을 비교하고자 하였다.

III. 도시홍수 재해 평가 방법

1. 연구대상 지역

본 연구는 2000년 이후 집중강우와 태풍으로 반복적이며, 심각한 피해를 경험한 부산지역을 대상으로 분석을 수행하였다. 부산시는 2008년, 2009년, 2011년 지속적으로 홍수피해가 발생하였으며, 2014년에는 전국에서 가장 큰 재해 피해지역으로 나타났다(국민안전처, 2014). 최근 2016년에는 태풍으로 해안에 인접한 지역이 막대한 침수피해를 입는 등 도시홍수 피해를 줄이기 위한 노력이 필요한 지역으로 분류될 수 있다.

2. 홍수 재해취약성 평가

홍수 재해취약성 분석 절차는 <Figure 2>와 같이 기후노출 및 도시민감도 지표를 각각 선정하여 공간정보로 가공하고 표준화(Z-score), 점수화하는 과정을 거쳐 최종 등급을 도출하는 과정을 거친다. 산출된 현재와 미래의 기후노출, 도시민감도 점수를 등급화(Natural Break)하고 매뉴얼에서 제공하는 등급 매트릭스를 통해 현재 취약성, 미래 취약성을 도출한다. 최종적으로 현재와 미래 취약성 분석결과를 중첩하고 상위 등급을 반영해 도시 종합 취약성을 작성하였다.

홍수 재해취약성 분석을 위한 평가 지표는 매뉴얼과 지침서를 기반으로 <Table 1>과 같이 구축하였다. 홍수 취약성 분석은 지침에서 제안하는 대로

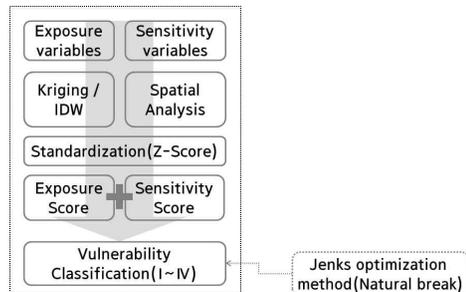


Fig 2. Flood vulnerability assessment flowchart

인구센서스 조사 시 가장 작은 단위인 집계구(보통 읍면동의 1/23 크기, 인구 최적 500명, 최소 300명 기준) 단위로 분석이 수행되었다. 현재 취약성 분석을 위한 데이터는 2014년 기준으로 수집되었으며, 일부 지표는 10년간 누적데이터를 활용하였다. 미래 취약성 분석은 2030년 기준의 RCP 8.5 기후변화 시나리오(현재의 온실가스 배출 경향이 지속됨)의 강수데이터를 활용하였다.

3. 홍수 리스크 평가 방법

홍수 리스크 평가는 <Figure 3>과 같이 진행되었다. 우선, 홍수발생가능성을 평가하고 발생가능성 결과에 대한 검증작업을 수행한 후, 홍수로 인한 피해 대상이 되는 인구와 재산 노출 정도를 공간적으로 중첩하여 곱한 후, 최종적으로 현재와 미래의 홍수 리스크를 평가하고 등급화 하였다.

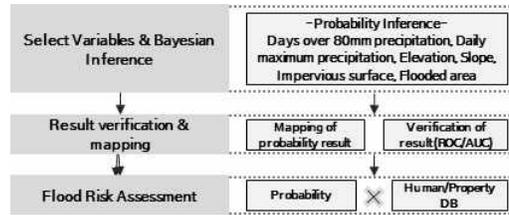


Fig 3. Flood risk assessment flowchart

앞서 언급했듯이 홍수발생가능성은 과거 침수경험을 기반으로 과거 침수에 영향을 미쳤던 요인들과의 관계를 기반으로 침수발생가능성을 추론하는 베이지안 기법을 활용하였다. 베이지안 기법은 특정 사건에 대한 이론과 경험 등 과거 자료를 선정하여 사전분포를 구축하고, 특정사건(모수)을 설명하는 관측변수를 선정한 후 통계조사와 실험 등을 통해 관측 값을 구축한다. 관심모수에 대한 관측 값이 나타날 조건부 확률을 구한 후, 구축된 사전분포와 조건부 확률을 베이즈 정리(식 1)를 통해 사후분포

Table 1. Flood vulnerability assessment variables

Classification		Flood, Heavy rain variable	Source	
Current climate exposure		- Days over 80mm precipitation(annual average) - Daily maximum precipitation(annual average)	Korea Meteorological Administration	
Current Urban Sensitivity Factor	Potential vulnerable area	- Damaged area during recent 10 years (Flooded area) - Areas vulnerable to natural disaster - Areas vulnerable to Landslide - Riverside low-lying lands	City of Busan, Korea Forest Service, National Disaster Information Center	
	Citizen	- Population over 65 years old and Under 5 years old (Census output area)	Statistical Geographic Information System	
		Urban Infrastructure	- Infrastructure in Census output area Roads, railways, water supply facilities, electricity supply facilities, gas supply facilities, heat supply facilities, broadcasting communication facilities, public spaces, oil storage and oil supply facilities, sewerage, water pollution prevention facilities	Ministry of Land, Infrastructure and Transport, National Geographic Information Institute
			Building	- Single-family house, semi-underground house
Future Climate Exposure		- Days over 80mm precipitation(annual average)	Korea Meteorological Administration	
Future Urban Sensitivity		- Urbanized areas in recent 10 years - Population growth areas in recent 10 years - Development Project areas	City of Busan, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, National Geographic Information Institute	

를 구하고 추론에 활용하는 기법이다(오만숙, 2012; 김달호, 2013).

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} = \frac{P(A) \cdot P(B|A)}{P(A) \cdot P(B|A) + P(\bar{A}) \cdot P(B|\bar{A})} \quad (1)$$

본 연구에서는 특정 사건을 홍수(침수지역)로 보고, 사건에 영향을 미치는 기상, 지형, 개발, 홍수저감시설 요인을 활용해 사전확률을 산정한다. 사전확률을 기반으로 추론하고자 하는 시점의 기상 정보를 구축·활용하고, 베이즈 정리를 통해 추론시점의 홍수발생가능성을 도출할 수 있다.

홍수발생가능성에 영향을 미치는 요인과 요인별 변수는 선행연구(배덕효·이문환, 2010; 손민우 등, 2011; 국립환경과학원·환경부, 2012; 강정은·이명진, 2012; 이상혁 외, 2016; 김지수 외, 2013; 최현일 외, 2013; 명수정 외, 2010)를 기반으로 <Table 2>와 같이 도출되었다. 홍수발생에 직접영향을 미치는 대표요인으로는 기상요인이 있으며, 본 연구에서는 강수량과 극한기상을 반영할 수 있는 일 최대강수량과 80mm이상일 날 수가 선정되었다.

지형요인은 물의 흐름 및 합류지점 결정에 직접적인 영향을 미치므로 고도, 경사도, 강으로부터의 거리 등이 주요 변수로 고려될 수 있다. 불투수면적은 지표면의 유출량과 토양의 배수능력에 직접적으로 영향을 미치는 요소로 도시지역에서는 가장 중요한 변수 중 하나이다. 홍수저감시설은 도시지역의 홍수저감에 중요한 영향을 미치는 요소로 리스크 평가를 위한 요인으로 고려될 필요가 있다.

최종 변수와 사용데이터는 일차적으로 재해취약성 분석에 사용된 데이터를 활용하고자 하였으며, 모델링 평가 특성상 그대로 사용하기 어려운 변수는 취약성 평가 시 사용되는 원데이터를 가공하여 리스크 평가에 적합하도록 변형하여 사용하였다. 모든 데이터는 30m×30m 셀별로 자료가 구축되었다.

특정 사건인 홍수는 재해취약성 분석 시 사용된 과거 침수지역 자료에서 도출하였으며, 이에 영향을 미치는 기상정보는 재해취약성 분석의 기상정보(80mm이상일 수, 일 최대강수량)가 그대로 사용되었다. 지형요인에는 경사도, 고도, 하천과의 거리 변수가 고려되었으며 이들 자료는 재해 취약성 평가의 하천변 저지대 데이터를 가공하여 구축하였다. 개발요인으로 포함된 불투수면적은 토지피복 자료

Table 2. Flood risk assessment variables

Classification	Variable		Type	Source	
Flood probability	Experience factor	Map of flooded areas	Discrete	City of Busan, Ministry of Public Safety and Security	
	Exposure factor	Days over 80mm precipitation	Continuous	Korea Meteorological Administration	
		Daily maximum precipitation			
	Geographical factor	Elevation		Continuous	Ministry of Land, Infrastructure and Transport, National Geographic Information Institute
		Slope			
		Distance to river		Continuous	
Development factor	Impervious surface area		Discrete	Environmental Geographic Information Service	
Facility factor	Disaster Prevention Facility		Discrete	National Geographic Information Institute	
Impact variable	Inventory factor	Population by census output area	Continuous	Statistical Geographic Information System	
		Appraised land value	Continuous data	City of Busan, National Geographic Information Institute	

Table 3. Comparison of flood vulnerability and risk assessment methods

Classification	Flood vulnerability assessment	Flood risk assessment
Spatial range	City of Busan	City of Busan
Method of analysis	Index or total score (Exposure, Sensitivity Index)	Probability of event × Impact (Human/Probability DB)
Applied variables	Use of variables adopted from the manual and guidelines	Use of selected variables among the flood vulnerability assessment variables
Unit of Spatial analysis	Census output area	30m×30m grid
Number of Units	5,912	881,350
Method of result display	Current vulnerability, Future vulnerability, total vulnerability (Unit: Census output area)	Current·Future probability, Current risk, Future risk, Total risk (Unit: 30m×30m grid)
Verification of results	-	AUC verification

를 활용하였다. 홍수저감 시설은 취약성 평가에서 사용된 도시기반시설 정보 중 방재시설을 추출하여 변수로 사용하였다.

본 연구의 리스크 평가는 베이지안 기법 중 사후분포 추정에 있어 난수 생성과 학습에 효과적인 MCMC(Markov Chain Monte Carlo) 시뮬레이션을 활용한다. MCMC를 활용한 베이지안 기법은 기계 학습(learning)을 통해 추정·예측하는 방법으로 다양한 분야에서 적용되고 있다. 또한 확률 외에도 관측가능한 정보를 바탕으로 조건부 확률을 활용해 관측되지 않는 지점의 정보를 예측·시뮬레이션 하는데도 활용되는 등 유용하고 안정된 방법이다(김달호, 2013; 오만숙, 2012).

현재 시점의 홍수 발생가능성 추정을 위해 각 변수들을 정규화하고, 정보의 50%를 무작위 추출하여 난수생성 및 학습을 통해 각 변수별 가중치를 산정하였다. 최종 발생가능성은 각 변수의 값과 가중치를 함께 고려하여 산정되었다. 추정된 발생가능성은 추출되지 않은 나머지 50% 자료를 이용해 유효성 검증(AUC, Area Under the Curve) 실시하였다. 유효성 검증을 거친 홍수발생가능성 추정 모델에 기후변화 시나리오에서 도출한 미래 기상정보를 반영하여 미래 홍수 발생가능성을 산정하였다.

마지막으로, 인명피해와 재산피해 측면의 홍수

리스크를 평가하기 위해 인구DB와 공시지가 DB를 구축하였다. 셀별로 구축된 인구와 공시지가 정보는 앞서 도출된 현재 및 미래 홍수발생가능성과 곱하고 등급화 하여 인구피해·재산피해 리스크로 평가되었다.

4. 평가 방법 및 절차 비교

본 연구의 취약성과 리스크 평가 방법을 비교 정리하면 <Table 3>과 같다. 기후변화 재해취약성은 노출과 민감도에 대해 매뉴얼과 지침에서 제안하는 지표를 선정하여 집계구별로 평가하였으며, 리스크는 30m×30m 격자별로 홍수 발생가능성과 영향을 받는 인명과 재산 정보를 중첩하여 분석하였다(Table 3).

평가의 공간분석단위를 비교해 보면 취약성 분석은 가장 작은 인구센서스인 집계구를 기본 분석단위로 총 5,912개의 공간으로 나누어 분석하였으며, 리스크 평가는 30m×30m의 격자로 총 881,350개의 공간으로 분석하였다.

취약성 분석은 기후노출과 도시민감도로 각각 계산 후, Jenks의 최적화 방법으로 4등급화하고, 취약성 매트릭스 합산을 통해 현재 취약성과 미래 취약성 결과를 도출했다. 또한 현재와 미래 취약성의

중점을 통해 도시 종합 취약성 결과로 나타낸다.

리스크 평가는 현재와 미래 발생가능성을 도출하여 각 영향(인명, 재산) DB 값을 곱하고 합산하는 과정을 통해 현재 및 미래 리스크를 도출하였다. 최종적으로 취약성 분석과의 비교를 위해 취약성 분석에서 제시하는 방법으로 등급화하고 현재와 미래 리스크의 중점을 통해 종합 리스크를 도출하였다.

결과 검증은 도시 기후변화 재해취약성 분석에서는 전문가의 심의를 통해 조정하는 과정을 포함하고 있다. 반면 리스크 평가의 경우 도출된 발생가능성 결과에 대해 신뢰도를 평가 할 수 있는 정량적 검증(AUC)이 가능하였다.

IV. 도시 홍수재해 평가 결과

1. 도시 홍수 취약성 분석결과

현재 재해취약성 분석 결과, 매우 취약 등급은 기후노출등급과 도시민감도 모두 취약한 지역이 중첩되는 부분으로 1등급인 “매우 취약”지역은 총 22개소, 0.53km²의 면적을 차지하고 있으며, 2등급인 “취약” 지역은 633개소로 면적은 118.23km²로 나타났다(Table 4). 지리적으로 “매우 취약”한 지역은 해운대구 송정동과 남구 용호동에서 나타나고 있다 (Figure 4. a). “취약” 지역은 동부산지역의 기장군이 가장 넓게 나타났다.

미래 재해취약성은 기후변화 시나리오인 RCP 8.5에 따른 2030년의 연평균 80mm/일 이상 강수 일수가 반영되어 평가되었다. 분석결과, 가장 취약한 1등급 지역은 173개소로 2.54km²의 면적을 차지하였으며, 2등급인 취약 지역은 596개소로 28.99km²로 나타났다(Table 4). 매우 취약한 지역은 금정구 온천동, 연제구 거제동, 남구 대연동, 사상구에는 업

Table 4. Result of flood vulnerability assessment

Current flood vulnerability				
Grade	Degree of vulnerability	Number of units	area(km ²)	area ratio(%)
1	Very high	22	0.53	0.07
2	High	633	118.23	15.02
3	Moderate	3,646	426.44	54.17
4	Low	1,611	241.99	30.74
total	-	5,912	787.19	100
Future flood vulnerability				
Grade	Degree of vulnerability	Number of units	area(km ²)	area ratio(%)
1	Very high	173	2.54	0.32
2	High	596	28.99	3.68
3	Moderate	2,640	322.76	41.00
4	Low	2,503	432.90	54.99
total	-	5,912	787.19	100
Total flood vulnerability				
Grade	Degree of vulnerability	Number of units	area(km ²)	area ratio(%)
1	Very high	195	3.07	0.39
2	High	1,137	144.78	18.39
3	Moderate	3,128	407.60	51.78
4	Low	1,452	231.74	29.44
total	-	5,912	787.19	100

공동과 과법동에 흩어져 위치하고 있다(Figure 4 (b)).

종합 홍수 취약성은 현재와 미래 취약성 결과의 중점을 통해 상위 등급을 반영하여 도출하였다. 상위 등급의 반영은 1등급(매우 취약)과 2등급(취약)을 대상으로, 현재 취약성 분석 결과에 미래 취약성 결과에서 새롭게 취약한 지역으로 평가된 지역의 상위 등급을 반영하여 종합 홍수 취약성을 분석함을 의미한다(국토교통부·국토연구원, 2013)

부산시의 종합 홍수 취약성 분석결과, 서부산권이 동부산권에 비해 상대적으로 안전하게 나타났으며, 취약지역은 부산시 전체에 분산되어 나타났다 (Figure 4, (c)). 전체 대상지역의 약 18.8%가 취약 지역으로 나타났으며, 그 중 매우 취약지역이 195개소(전체 면적대비 0.39%), 취약지역이 1,137개소(전체 면적대비 18.39%)로 나타났다(Table 4). 공간

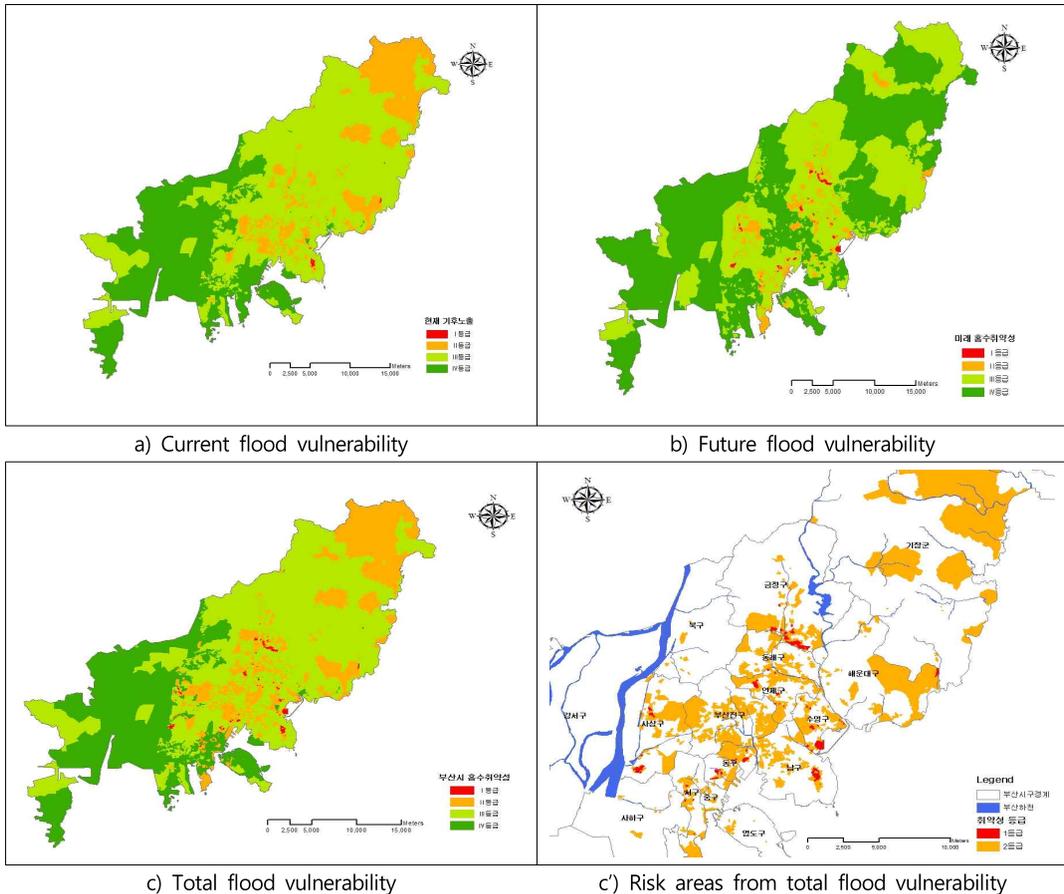


Fig 4. Current and future flood vulnerability

적으로 금정구 장전·부곡 및 서동과 연제구 거제동, 남구 용호동과 수영구 남천동, 사상구 엄궁동, 해운대 송정동에서 높은 취약성을 보였다. 기장군에도 장안읍과 일광·정관면 일부 등 넓은 취약지역이 나타났다.

2. 도시 홍수 리스크(Risk) 평가 결과

1) 홍수 발생가능성 추정 결과

발생가능성은 침수지역 정보를 바탕으로 계산된다. 부산시에서 2014년 침수 이후에야 침수흔적도를 체계적으로 구축한 바, 2014년 침수흔적 정보를

기반으로 홍수 발생가능성을 도출하였다. 침수발생가능성은 예측 값으로 결과에 대한 검증이 필요하며, 앞서 서술한 것과 같이 검증은 실제 발생지역과의 비교를 통해 이루어질 수 있다. 현재는 2014년 자료만이 활용될 수 있으므로 본 연구에서는 침수정보가 구축된 격자(881,350개) 중 50%를 무작위 추출(Random Sampling)하여 홍수 발생가능성을 추정하고, 추출되지 않은 50%의 격자를 활용해 검증을 실시하였다.

본 연구에서는 베이지안 추론에 기반을 둔 MCMC 시뮬레이션의 활용으로 홍수 발생가능성을 분석하였으며, 추정을 위해 선정된 변수는 정규화를

통해 0-1사이의 값을 갖도록 하였다. 난수생성 및 학습에는 무작위 추출을 통해 각 지표별 가중치 계산을 10회 실시하였으며, 홍수 발생가능성 추정에는 평균값을 활용하였다(Table 5).

부산시를 대상으로 분석결과, 홍수발생에는 볼투수면적, 강수량 80mm/일 이상일 수, 시간최대 강수량, 하천거리는 양의 가중치를, 고도, 경사도, 방재시설에는 음의 가중치가 나타났다. 특히, 극한 기상 변수인 시간 최대 강수량이 다른 지표에 비해 상대적으로 높은 가중치를 가졌으며, 고도, 경사도 순으로 발생가능성에 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 도출된 지표별 가중치를 각 요인에 부여해 계산한 홍수 발생가능성 지수를 활용해 <Figure 5>와 같은 홍수 발생가능성 지도를 작성하였다. 지도는 홍수 취약성 분석과 비교를 위해 4개의 등급으로 구분하여 표현하였다. 발생가능성이 높은 지역인 1등급과 2등급 지역은 각각 130.18km², 283.71km²로 금정구, 동래구, 연제구에서 발생가능성이 높은 지역이 넓게 나타났다. 반대로 산지의 비중이 높고 상대적으로 고도가 높은 북구, 사상구, 해운대구, 강서구 일대에서는 가장 낮은 발생가능성을 보였다.

추정결과에 대한 유효성의 정량적 검증을 위해 예측의 판단결과를 보여주는 ROC(Receiver Operating Characteristic) 곡선의 아래 면적인 AUC(Area Under the Curve) 값을 분석하였다. 본 연구의 베이지안 기법을 활용한 침수 발생가능성 추정 결과와 실제 발생지역과 비교하였을 때 84.3%의 정확도를 나타냈으며, 이는 베이지안 기법을 활용한 확률통계모형의 추정 신뢰도가 상당히 높음을 의미한다.

베이지안 추정을 기반으로 취약성 분석에서 활용된 2030년 기준 미래 강수자료를 이용하여 미래 발생가능성을 추정하였다. 미래 홍수발생가능성의 가장 높은 발생가능성 지역인 1등급이 76.60km²로 현재 발생가능성 대비 약 6.8% 감소하였으며, 2등급 지역은 321.61km²로 약 4.8% 증가하였다. 이러한 결과는 2030년 시나리오상의 강수량이 현재까지의 경험적 강수 자료보다 오히려 적게 나타나는 것으로 예측되었기 때문이다. 지리적으로는 기장군과 강서구 일부 지역, 수영구 광안동 일대에서 발생가능성이 감소하였으며, 광복·남포동 등 중구 일부와 서구 암남동 일대에서 새롭게 높은 홍수발생가능성을 보였다.

Table 5. Assessing the weights of the indicators using bayesian inference

	Variable	1	2	3	4	5	6
1	Elevation	-0.0379	-0.0360	-0.0379	-0.0369	-0.0368	-0.0364
2	Slope	-0.0256	-0.0263	-0.0261	-0.0256	-0.0258	-0.0263
3	Impervious surface area	0.0109	0.0112	0.0105	0.0114	0.0101	0.0111
4	Days over 80mm precipitation	0.0187	0.0180	0.0203	0.0183	0.0177	0.0185
5	Daily maximum precipitation	0.0714	0.0697	0.0704	0.0708	0.0701	0.0695
6	Distance to river	0.0174	0.0172	0.0181	0.0166	0.0167	0.0169
7	Disaster Prevention Facility	-0.0099	-0.0108	-0.0095	-0.0110	-0.0104	-0.0092
	Variable	7	8	9	10	Average	Std.
1	Elevation	-0.0370	-0.0370	-0.0378	-0.0370	-0.0371	0.00136
2	Slope	-0.0253	-0.0270	-0.0264	-0.0264	-0.0261	0.00116
3	Impervious surface area	0.0108	0.0110	0.0106	0.0111	0.0109	0.00039
4	Days over 80mm precipitation	0.0180	0.0178	0.0194	0.0199	0.0187	0.00129
5	Daily maximum precipitation	0.0703	0.0716	0.0714	0.0696	0.0705	0.00126
6	Distance to river	0.0168	0.0169	0.0186	0.0182	0.0173	0.00160
7	Disaster Prevention Facility	-0.0102	-0.0107	-0.0099	-0.0105	-0.0102	0.00221

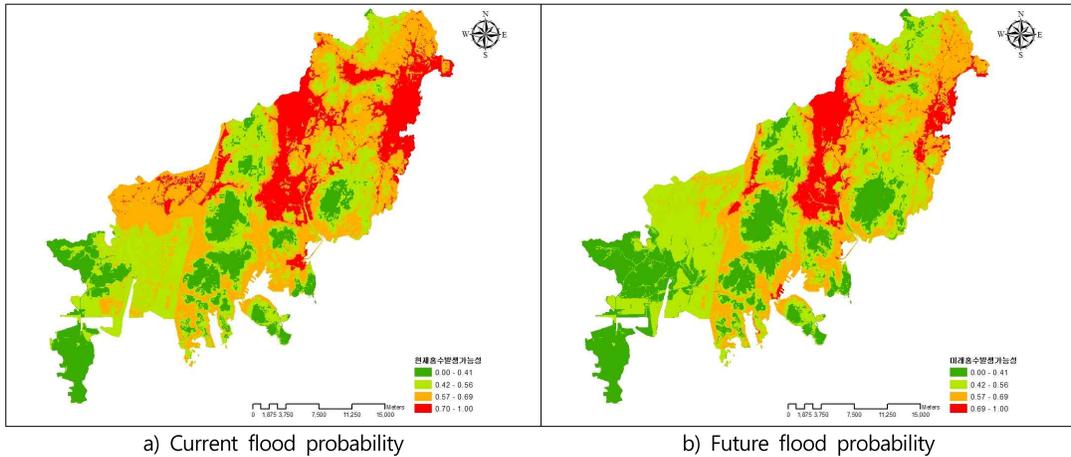


Fig 5. Flood probability inference

2) 홍수 리스크 평가 결과

리스크 평가는 일차적으로 도출한 홍수 발생가능성과 인구밀도의 곱을 통해 인명피해 리스크를, 공시지가와의 곱을 통해 재산피해 리스크를 계산하였다. 각각 도출된 인구·재산 리스크의 연산과정을 통해 현재와 미래 홍수 리스크를 계산하였다. 종합 리스크는 재해취약성 분석과 동일하게 중첩을 통해 현재 리스크와 미래 리스크 결과 중 상위 등급을 반영하였다.

홍수 리스크 평가는 <Table 6>과 같으며, 현재 홍수 리스크는 1등급(매우 위험)지역이 8,206개로 약 7.39km²의 면적을 차지하고, 2등급(위험)인 지역이 약 49.75km²로 전체 면적대비 7.2%를 차지하였다. 종합 리스크 평가 결과는 하천주변과 도심·시가지에 집중된 것을 확인 할 수 있으며, 중구의 부평·광복·남포동과 초량동에서 높은 위험도를 보이며, 부산진구의 전포와 부전동에서 위험지역이 매우 밀집된 것을 볼 수 있다. 또한 온천천을 따라 위험지역이 집중되어 있으며, 연제구와 동래구는 1·2등급지역이 넓게 분포하고 있다. 미래 홍수 리스크는 현재 홍수 리스크 결과와 비슷한 경향을 보

이고 있으며, 면적상으로는 1·2등급 지역이 각각 약 6.50km²와 약 46.93km²로 약간 감소하는 추세를 보이며, 3등급(보통) 지역은 약 48.29km²로 절반이상

Table 6. Result of flood risk assessment

Current risk				
Grade	Degree of risk	Number of units	area(km ²)	area ratio(%)
1	Very high	8,206	7.385	0.93
2	High	55,280	49.752	6.27
3	Moderate	124,789	112.310	14.16
4	Low	693,075	623.768	78.64
total	-	881,350	793.215	100.00
Future risk				
Grade	Degree of risk	Number of units	area(km ²)	area ratio(%)
1	Very high	7,219	6.497	0.82
2	High	52,144	46.930	5.91
3	Moderate	53,652	48.287	6.09
4	Low	768,335	691.501	87.18
total	-	881,350	793.215	100.00
Total risk				
Grade	Degree of risk	Number of units	area(km ²)	area ratio(%)
1	Very high	8,462	7.616	0.96
2	High	56,098	50.488	6.37
3	Moderate	123,753	111.378	14.04
4	Low	693,037	623.733	78.63
total	-	881350	793.215	100.00

감소하였다. 반대로 “양호”한 지역인 4등급 지역은 약 691.51km²로 현재 홍수 리스크 보다 약 67.73km² 증가한 것으로 나타났다. 이는 미래 홍수발생가능성이 2030년 기준 미래 강수 시나리오의 영향으로 발생가능성이 현재 발생가능성보다 낮게 추정되어 나타난 결과로 해석된다.

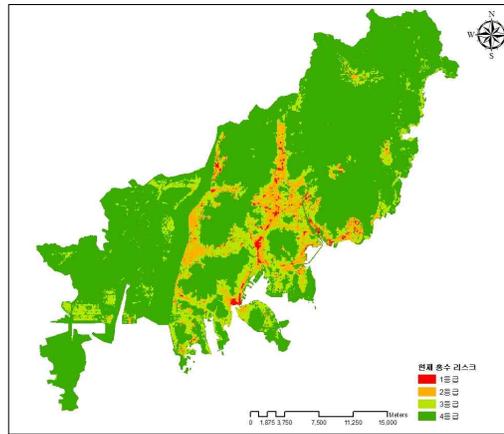
종합 홍수 리스크는 전술한 것과 같이 현재 홍수 리스크를 기반으로 미래 홍수 리스크 결과 중 중점을 통해 상위등급을 반영하여 도출하였다. 현재 홍수 리스크 대비 미래 홍수 리스크는 “매우 위험”(1등급)이 격자기준 256개(0.23km²), “위험”(2등급) 지역이 격자기준 1,074개(0.97km²) 증가하여 (Figure 6)의 (c)와 같은 결과를 나타냈다.

3. 평가 결과 비교

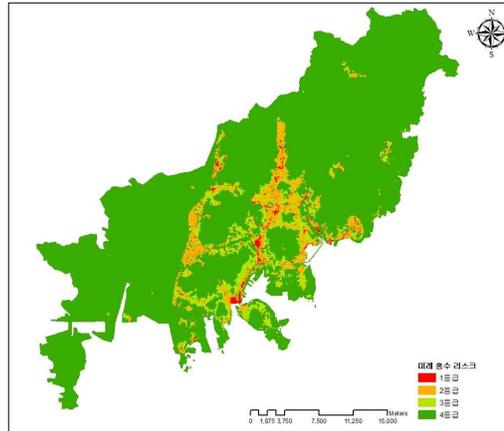
이번 절에서는 본 연구에서 진행한 부산시 홍수 취약성 분석 결과와 리스크 평가 결과를 비교하였다. 결과 비교는 위험지역에 대한 상대 면적(Table 4, Table 6), 위험지역의 지리적 분포, 두 분석 위험지역의 중점을 통한 유사성 검토 측면에서 이루어졌다. 또한, 추정치와 실제값과의 일치정도인 정확도를 검증하기 위해 두 분석을 통해 도출된 추정치와 실제 피해정보와의 상관관계를 살펴보았다.

취약성 분석에서 위험지역(1등급, 2등급)은 전체 면적의 약 19%(147.85km²)를, 리스크 평가에서는 전체면적의 약 7.3%(58.10km²)를 차지해 취약성 분석이 10% 이상 더 넓은 홍수 위험지역을 나타내고 있다. 취약성 분석 결과에서는 3등급이 전체의 약 52%를 차지하고, 리스크 평가에서는 4등급이 약 78.6%로 가장 넓게 나타나고 있어, 취약성 분석의 위험지역이 다소 넓게 평가되고 있는 것으로 보인다.

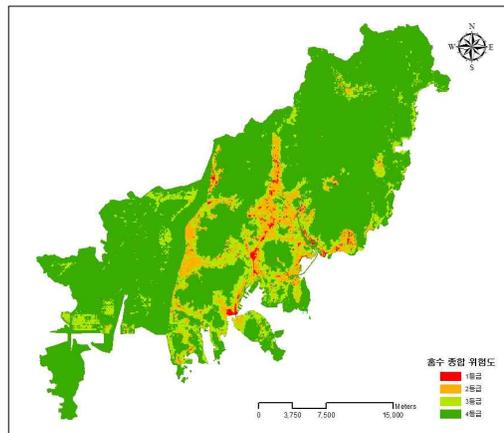
두 평가에서 도출된 위험지역의 지리적 분포를 비교한 결과는 다음과 같다. 취약성과 리스크 결과



a) Current flood risk



b) Future flood risk



c) Total flood risk

Fig 6. Urban flood risk map

도시계획 적용을 위한 도시홍수 취약성 및 리스크 평가

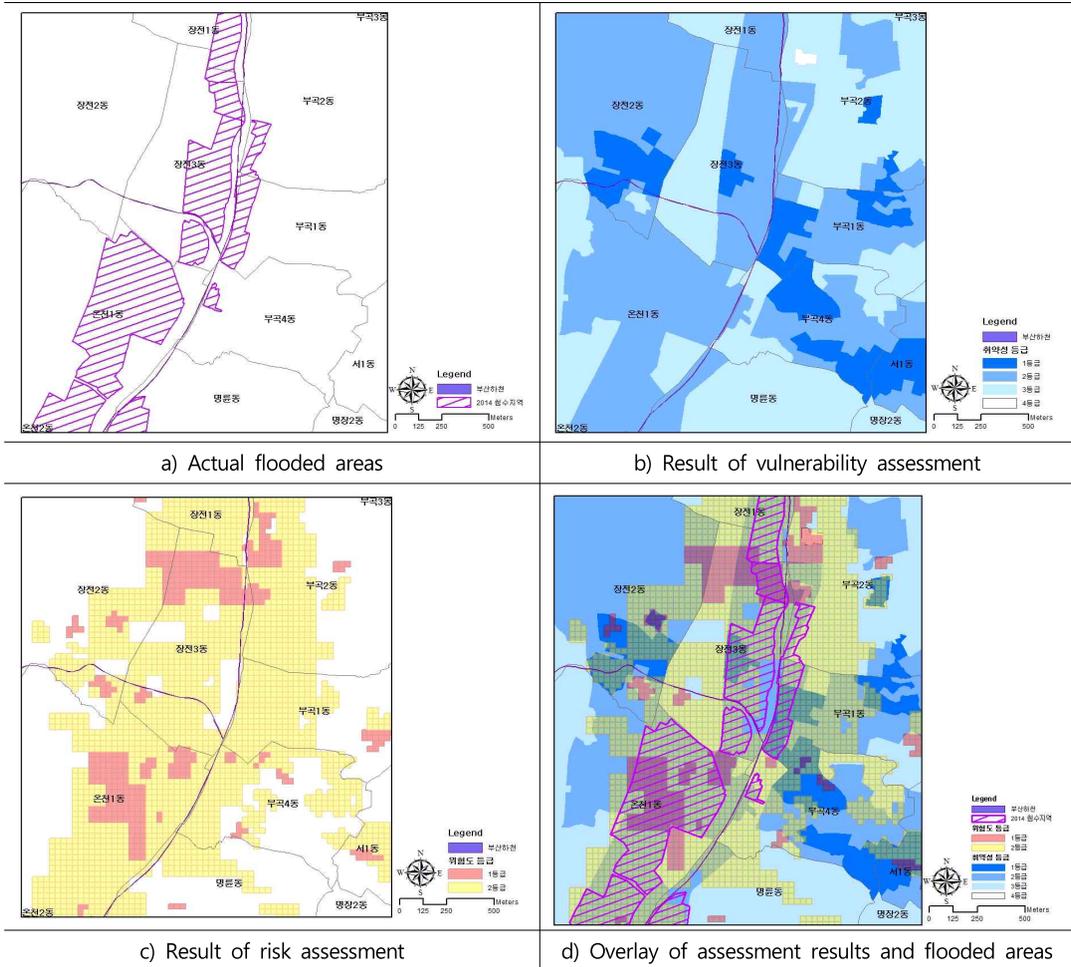


Fig 7. The assessed result overlaid with the actual flooded area(Geumjeong·Dongrae-gu, 2014)

모두 낙동강을 기준으로 서측인 강서구에서는 위험 지역이 거의 나타나지 않았으며, 강을 따라 동측인 북구와 사상구에서 공통적으로 위험지역이 다수 나타났다. 부산의 동구 초량, 부산진구 범일·부전·문현, 연제구 거제·연산, 동래구 온천, 금정구 부곡·장전 등 부산 중심지역과 수영구 광인·민락, 남구 용호·대연, 해운대구 좌동에서도 위험지역이 공통적으로 나타나 취약성과 리스크 평가의 위험지역은 공간적으로 비슷한 분포 경향을 보였다.

이러한 위험지역의 공간 분포는 해당지역의 지

형, 환경, 사회·경제적 영향들과 밀접하게 관계가 있는 것으로 보인다. 낙동강 인접 저지대들은 대체로 침수위험이 존재하지만 서측 지역은 상대적으로 개발이 덜 되고, 인구집중도 적어 취약성과 리스크가 모두 낮게 나타난 반면, 동측 지역은 충분한 방재역량을 갖추지 못한 채로 급격히 개발된 지역이 많아 취약성과 리스크가 모두 높게 나타났다. 부산진구 범일·부전·문현, 동구 초량 등의 대표적인 부산의 원도심 지역들은 산지로 둘러싸인 저지대로 경사가 급하고 유로길이가 짧아 홍수피해 위험이

높은 지형적 특성과 급격한 도시개발로 홍수에 노출된 재난과 인구가 많은 사회경제적 특성으로 취약성과 리스크가 모두 높게 나타났다. 연제구, 동래구, 해운대구와 남구, 수영구의 주요 위험지역들도 인구가 개발이 밀집된 저지대로 동일한 기후영향에도 상대적으로 높은 취약성과 리스크를 동시에 보이는 것으로 나타났다.

반면, 기장군에서는 취약성 분석결과 위험지역이 넓게 나타나고 있으나, 리스크 평가 결과에서는 정관면과 기장읍 일부 지역에서만 위험지역이 소규모로 나타나는 차이를 보였다. 이는 취약성 분석이 집계구단위로 이루어지다보니 인구밀도가 낮은 기장군의 집계구 개별 면적이 다른 지역에 비해 상대적으로 커서 나타나는 현상으로 확인되었다.

취약성과 리스크 평가 결과 간 중첩을 통해 두 결과의 일치정도를 살펴보면 다음과 같다. 취약성 분석의 위험지역인 1,332개의 집계구 중 1,031개의 집계구(77.4%)가 리스크 결과의 위험지역과 중첩되어 비교적 높은 일치성을 보였다. 이를 면적으로 계산하면 일치하는 면적은 63.25km²로 전체 취약성 분석 위험지역 면적의 약 42.78%를 차지한다. 결과 간 중첩되는 집계구 개소의 비율(77.4%)에 비해 일치 면적의 비율(42.8%)이 낮게 나타나는 것은 전술한 바와 같이 중첩되지 않는 기장군의 집계구 면적(약 70.48km²)이 전체 위험지역의 큰 비중(약 47.7%)을 차지하고 이로 인한 영향으로 해석될 수 있다.

두 분석 결과와 2014년 실제침수지역과 비교해 본 결과, 취약성 평가에 따른 위험지역 147.85km² 내 포함되는 침수지역 면적은 9.56km²이며, 리스크 평가 58.10km² 내 포함되는 면적은 6.68km²로 나타났다. 위험지역 내 포함되는 실제침수지역 면적의 비율은 취약성 평가가 약 6.47%, 리스크 평가는 약 11.5%로 나타났다.

두 평가 결과의 정확성 검증을 위해 2014년 심각한 피해가 발생했던 금정구의 실제 피해자료(피

해 필지별 피해액, 2,515건)를 활용하여 피해정도와 취약성 등급, 리스크 등급과의 상관관계를 살펴보았다(Table 7). 리스크 등급과 피해액은 통계적으로 유의미한 상관관계($r=-0.163$, $p<0.00$)를 나타내고 있으며 이는 리스크 등급이 낮은 상태, 즉 위험성이 높은 지역일수록 실제 피해액이 높았음을 나타내고 있다. 그러나 취약성 등급과 실제 피해액은 유의미한 상관관계를 나타내지 못했다. 이는 리스크 평가 결과가 취약성 분석보다 정확도가 상대적으로 높은 것으로 해석될 수 있다.

취약성 분석과 리스크 평가의 결과 비교를 정리하면, 위험지역의 공간적 패턴은 유사하게 나타나고 있으며, 주요 위험지역도 공통적으로 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 두 평가결과와 실제 피해자료의 상관관계를 분석했을 때 리스크 평가결과가 통계적으로 유의미한 관계를 보였으며, 리스크가 높은 지역에서 실제 피해액도 높게 나타났다.

두 분석결과간의 세밀한 공간분포 및 면적의 차이는 분석공간단위, 사용된 데이터 등 분석 방법론의 차이에서 시작되는 것으로 보인다. 취약성 분석은 앞서 언급했듯이 지표를 활용하여 상대적으로 쉽게 접근할 수 있으나, 분석단위가 리스크 평가에 비해 정밀함이 떨어지는 경향을 보였다. 리스크 평가는 상대적으로 정밀한 공간의 분석이 가능한 장점이 있으며, 과거 정보를 기반으로 학습을 통해 신뢰성 있는 발생가능성을 예측할 수 있으며, 영향을 받는 인벤토리 DB를 활용하여 다양한 측면의 피해가능성을 평가한다는 점에서 장점이 있다. 이러

Table 7. Correlation result

Spearman's rho		Class	
		Vulnerability	Risk
Damage	Corr. Coeff.	0.038	-0.163**
	Sig.(2-tailed)	.057	.000
	N	2515	2515

** . Correlation is significant at the 0.01 level

한 두 방법론의 차이는 도시계획 수립을 위한 재해 평가에 있어 취약성 분석과 함께 리스크 평가가 상호보완적으로 사용될 수 있는 가능성을 보여준다고 하겠다.

V. 결론 및 시사점

본 연구는 도시계획에서 기후변화 재해를 고려하기 위해 도입된 「도시 기후변화 재해취약성 분석」과 최근 기후변화 분야를 중심으로 강조되고 있는 리스크 평가를 도시홍수 재해를 대상으로 평가하고 이들의 분석 방법 및 평가결과를 비교하였다. 재해 취약성 분석은 매뉴얼과 지침에 따라 수행하였으며, 리스크 평가는 선행연구를 기반으로 확률·통계적 방법인 베이지안 추론을 활용하여 평가하였다.

부산시를 대상으로 취약성과 리스크를 분석한 결과, 위험지역의 지리적 분포는 유사하게 나타났다. 부산의 홍수 위험지역은 취약성, 리스크 평가 모두 기장군을 제외한 부산의 중심부(중구, 부산진구, 연제구 등)와 동부(수영구, 남구 등)에서 전반적으로 유사하게 나타났다. 그러나 취약성 분석의 위험지역 면적이 리스크 평가보다 두 배 이상 넓게 나타났다. 이는 기장군 위험지역의 집계구별 면적이 다른 지역에 비해 넓어 이러한 결과가 발생하는 것으로 해석된다. 취약성과 리스크 평가 결과의 중첩을 통해 위험지역과 면적을 비교하면, 취약성 분석 기준 위험한 지역인 1,332개의 집계구 중 1,031개의 집계구(77.4%)가 리스크 결과의 위험 지역과 중첩되는 것으로 나타났다. 전체 위험지역에 대한 실제 침수지역과의 비교에서는 취약성 평가 결과 위험지역(147.85km²)에는 9.56km²(위험지역 면적대비 6.47%)가 포함되고, 리스크 평가 결과 위험지역(58.10km²) 내 6.68km²(위험지역 면적대비 11.5%)를 포함하였다. 정확성 검토를 위해 금정구의 피해 자료를 구축하

고 평가결과와 상관관계 분석을 진행하였다. 리스크 평가 결과가 실제 피해와 통계적으로 유의미한 상관관계를 나타내어 리스크 평가 결과의 정확도가 취약성 평가보다는 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

이렇게 두 분석의 결과가 큰 맥락에서 유사성을 가지는 반면, 차이점도 함께 나타나는 이유는 활용되는 데이터에서부터 분석의 공간단위, 위험지역 도출 계산법, 결과에 대한 검증방법의 유무까지 다양한 측면에서 차이를 보이기 때문이다.

우선, 취약성 분석은 제공되는 매뉴얼과 지침에 따라 지표를 활용하여 평가를 수행하므로 실무자 및 관계자들의 접근이 쉽고 평가결과의 비교가 용이하며, 이해가 쉽다는 장점이 있다. 또한 분석의 공간단위가 집계구로 설정되어 있어 분석과정이 상대적으로 짧은 시간에 진행될 수 있다. 그러나 적응부분의 지표가 배제되어 있으며, 매뉴얼 상 제시된 지표의 자료가 부재하거나, 데이터의 가공 방법이 명시되어 있지 않은 경우가 있었다. 또한 획득이 어려운 기관 내부 자료가 사용되어야 하거나, 고도의 가공과정이 필요한 경우가 있으며, 이러한 구축이 어려운 자료의 경우 대체자료에 대한 명확한 기준이 제시되어 있지 않아 분석 결과의 정확성이 떨어질 수도 있다. 따라서 분석과정에 대한 지표 및 변수의 추가, 수집, 가공 등에 대한 내용 보완이 필요하다고 할 수 있다. 마지막으로 취약성 분석의 분석결과는 정량적으로 검증할 수 있는 방법이 사실상 부재하며, 전문가 워크숍을 통해 정성적으로 살펴보도록 제시하고 있다. 또한 집계구 단위의 취약성 분석결과는 보다 세밀한 공간단위로 분석된 기타 분석 결과보다는 위험지역이 과대하게 추정되는 문제점들이 존재하며, 도시계획의 구체적인 토지이용계획, 기반시설계획, 공원녹지계획 등의 입지계획에 사용되기 어려운 측면이 존재한다.

리스크 평가는 공간분석단위를 세밀화하여, 고도

화된 공간분석이 가능하며 따라서 분석 결과의 정확도도 상대적으로 높게 나타난다. 또한 분석결과에 대한 정량적 검증이 가능한 장점이 있다. 그러나 확률 통계 분석 기법, 모델링 기법 등 분석과정에 있어 전문성이 요구되며, 고해상도의 공간분석을 위한 데이터 획득의 어려움, 넓은 지역의 분석인 경우는 시간과 비용의 부담이 크게 발생한다는 단점이 존재한다.

심화되는 기후변화와 이로 인한 재해는 도시에 다양한 피해를 미치므로 재해에 효과적으로 대응하고 안전한 도시구축을 위해 토지이용 뿐 아니라 다양한 도시계획에 재해에 대한 취약성과 리스크가 함께 반영될 필요가 있다.

현재 도시계획에서 제도화된 기후변화 재해 취약성 분석은 자료 접근성, 분석의 비용적·시간적 장점을 가지고 있지만, 공간적 정확성, 결과검증 방법의 부재 등에는 한계점을 가지고 있다. 이러한 시사점을 바탕으로 재해평가에 있어 취약성 분석의 보완이 필요하며, 더불어 단일한 접근법이 아닌 복수의 방법을 활용하거나 선택적 적용을 가능하게 하여 결과의 신뢰도와 활용도를 높일 필요가 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서 진행한 리스크 평가는 세밀한 공간단위 분석과 신뢰도 평가가 가능해 위험지역의 과대추정 문제점들을 고려할 수 있다. 이는 도시계획의 토지이용계획, 기반시설계획, 공원 녹지계획 등 구체적인 계획의 수립과정에 보다 정밀한 자료로 사용 될 수 있다. 또한 세계적인 기후변화 연구의 트렌드와 방법론 자체의 장점을 고려할 때 장기적으로도 활용도가 높을 것으로 기대된다.

마지막으로 본 연구는 분석과정에서 몇 가지 한계점을 가진다. 홍수 취약성 분석 지침은 하천별 계획홍수위 자료를 활용할 것을 제안하였으나 자료의 획득 및 가공이 어려워 하천변 30m, 저지대 자료를 대체 사용하였으며, 미래 시나리오 강수량 자

료는 기상청에서 제공하는 ASCII 자료 고도화의 한계로 각 구별 미래 강수량 데이터를 활용하여 분석하였다. 또한 베이지안 추론을 활용한 리스크 평가에서도 침수흔적에 대한 자료의 부재와 획득어려움으로 2014년 침수흔적 자료만을 사용한 한계점이 존재한다. 그러나 이러한 한계점은 지속적인 공간데이터의 구축, 가공방법의 개선과 빅데이터 처리 도구의 활용과 같은 추가적인 연구를 통해 보완할 수 있을 것으로 생각된다.

인용문헌

References

1. 강정은·엄정희·배현주·최희선·이명진·강원원·박재철, 2012. 「기후변화 적응형 도시구현을 위한 그린인프라 전략 연구」, 세종: 한국환경정책평가연구원.
Kang, J. E., Eum, J. H., Bae, H. J., Choi, H. S., Lee, M. J., Kang, Y. W., Park, J. C., 2012, *Green Infrastructure Strategy for Urban Climate Adaptation*, Sejong: Korea Environment Institute.
2. 강정은·이명진, 2015. “인공신경망을 활용한 서울시 도시기반시설 침수위험지역 분석”, 「대한토목학회논문집」, 35(4): 997-1006.
Kang, J. E., Lee, M. J., 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.
3. 고재경·김희선, 2009. 「경기도 기후변화 취약성 평가 연구」. 수원: 경기연구원.
Koh, J.K., Kim, H.S., 2009, *A Study on Vulnerability Assessment to Climate Change in Gyeonggi-Do*. Suwon: Gyeonggi Research Institute.
4. 국립국어원, “표준국어대사전”, stdweb2.korean.go.kr
National Institute of Korean Language, “Standard Korean Language Dictionary”, stdweb2.korean.go.kr
5. 국립기상연구소, 2011. 「IPCC 5차 평가보고서 대응

- 을 위한 기후변화 시나리오보고서」, 제주.
National Institute of Meteorological Sciences, 2011. *Climate Change Scenario Report for Response to IPCC AR5*. Jeju.
6. 국립환경과학원·환경부, 2012. 「지자체 기후변화 적응 세부시행계획 수립 지원을 위한 기후변화 부문별 취약성 지도」, 인천.
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*, Incheon
 7. 국민안전처, 2011, 「재해연보」, 세종.
Ministry of Public Safety and Security, 2011. *Disasters Report*, Sejong.
 8. 국민안전처, 2014, 「재해연보」, 세종.
Ministry of Public Safety and Security, 2014. *Disasters Report*, Sejong.
 9. 국민안전처, 2015, 「재해연보」, 세종.
Ministry of Public Safety and Security, 2015. *Disasters Report*, Sejong.
 10. 국토교통부·국토연구원, 2013. 「도시기후변화 재해취약성 분석 매뉴얼」, 세종.
Ministry of Land, Infrastructure and Transport, and Korea Research Institute for Human Settlements, 2013. *Climate Change Vulnerability Assessment manual*, Sejong.
 11. 김달호 2013. 「R과 WinBUGS를 이용한 베이저안 통계학」, 과주: 자유아카데미.
Kim D. H., 2013. *Bayesian Statistics using R and WinBUGS*, Paju: FreeAcademy.
 12. 김동현, 2015. “기후변화 적응을 위한 리스크 평가 및 유형화: 영국의 정성적 리스크 평가 방법론 적용”, 「환경정책연구」, 14(1): 53-83.
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.
 13. 김지수·성효현·최광용, 2013. “도시 홍수 취약성의 공간적 분포 : 서울 지역을 중심으로”, 「한국지역 지리학회지」, 19(4): 615-626.
Kim, J. S., Sung, H. H., Choi, G. Y., 2013. “Spatial Patterns of Urban Flood Vulnerability in Seoul”, *Journal of the Korean Association of Regional Geographers*, 19(4): 615-626.
 14. 김지숙·김호용·이성호, 2014. “도시 기후변화 재해 취약성분석 방법의 개선방안 검토 : 해수면상승 재해를 중심으로”, 「한국지리정보학회지」, 17(1): 50-60.
Kim, J. S., Kim, H. Y., Lee, S. H., 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.
 15. 김지연·성선용, 2016. “확률론적 모의 기법을 활용한 기후변화에 따른 수원시 침수 발생가능성 지도 구축”, 「국토계획」, 51(2): 255-265.
Kim, J. Y., Sung, S. Y., 2016. “Forecasting Possibility of Flood Occurrence in Suwon under Climate Change Applying Stochastic Simulation”, *Journal of Korea Planning Association*, 51(2): 255-265.
 16. 김환석·박기정·김상단·최민하·박무중·윤재영, 2012. “기후변화와 대규모 하천정비 사업을 고려한 낙동강 유역 자연재해 홍수 취약성 평가”, 「한국방재학회지」, 12(2): 107-113.
Kim, H. S., Park, G. J., Kim, S. D., Choi, M. H., Park, M. J., Yoon, J. Y., 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.
 17. 김효민·이동근·박찬, 2013. “MaxEnt를 이용한 서울시 도시홍수 적응능력 취약지역 선정에 관한 연구”, 「국토계획」, 48(4): 205-217.
Kim, H. M., Lee, D. G., Park, C., 2013. “A Study on Selection for Vulnerable Area of Urban Flooding Adaptable Capacity Using MaxEnt in Seoul”, *Journal of Korea Planning Association*,

- 48(4): 205-217.
18. 남기훈, 2014. “베이지안 네트워크를 이용한 복합 재난 위험성 평가에 관한 연구”, 인제대학교 대학원 박사학위논문.
Nam, G. H., 2014. “A Study on the Compound-Disaster Risk Assessment by Utilizing the Bayesian Network”, Ph. D. Dissertation, Inje University.
 19. 명수정·김지영·신상희·안병욱, 2010. 「기후변화 적응 강화를 위한 사회기반시설의 취약성 분석 및 대응방안 연구Ⅱ」, 세종: 한국환경정책평가연구원.
Myeong, S. J., Kim, J. Y., Shin, S. H., An, B. O., 2010. *Assessing vulnerability to climate change of the physical infrastructure in Korea and developing adaptation strategies*, Sejong: Korea Environment Institute.
 20. 박무종·송영석·주진걸·박민규, 2013. “도시홍수 취약성 평가에 대한 연구”, 「한국방재학회지」, 13(5): 297-305.
Park, M. J., Song, Y. S., Joo, J. G., Park, M. K., 2013. “A Study on Urban Flood Vulnerability Assessment”, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(5): 297-305.
 21. 박상진·이동근·성선용·정태웅, 2014. “Bayesian Network를 이용한 해수면 상승에 따른 잠재적 침수위험 평가”, 「국토계획」, 49(2): 347-358.
Park, S. J., Lee, D. K., Sung, S. Y., Jung, T. Y., 2014, “Risk Assessment of Potential Inundation Due to Sea Level Rise Using Bayesian Network”, *Journal of Korea Planning Association*, 49(2): 347-358.
 22. 박창석·송영일·이승한·김유정·변병설·채정은·박소연·김수영·김진아·정민선·안병욱·이은선, 2014. 「기후환경 리스크 전망과 국가전략(I)」. 세종: 한국환경정책평가연구원.
Park, C. S., Song, Y. I., Lee, S. H., Kim, Y. J., Byun, B. S., Chae, J. E., Park, S. Y., Kim, S. Y., Kim, J. A., Jung, M. S., Ahn, B. O., Lee, E. S., 2014. *Climate-environmental risks outlook and the national strategy(I)*. Sejong: Korea Environment Institute.
 23. 심우배, 2013. 「도시의 기후변화 재해취약성 분석 발전방안 연구」, 세종: 국토연구원.
Sim, W. B., 2013. *A Study on Improving the Methods to Analyze Urban Disaster Vulnerability due to Climate Change*, Sejong: Korea Research Institute for Human Settlements.
 24. 오만숙, 2012. 「R 몬테칼로와 함께하는 베이지안 통계추론」, 과주: 자유아카데미.
Oh, M. S. 2012. *Bayesian Statistical Inference with R-Monte Carlo*. Paju: FreeAcademy.
 25. 유가영·김인애, 2008. 「기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안」, 세종: 한국환경정책평가연구원
Yoo, G.Y., Kim, I.H., 2008. *Development and application of a climate change vulnerability index*, Sejong: Korea Environment Institute.
 26. 이명진·강정은, 2012. “빈도비 모델과 GIS를 이용한 침수 취약 지역 예측 기법 개발 및 검증”, 「한국지리정보학회지」, 15(2): 86-102.
Lee, M. J., Kang, J. E., 2012. “Predictive Flooded Area Susceptibility and Verification Using GIS and Frequency Ratio”, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 15(2): 86-102.
 27. 이병재, 2014. 「도시 기후변화 재해 취약성 분석 지원 플랫폼 구축방안 연구」, 세종: 국토연구원.
Lee, B. J., 2014. *Supporting platform for the analysis of climate change driven disaster vulnerability in urban area*, Sejong: Korea Research Institute for Human Settlements.
 28. 이상혁·강정은·박창석, 2016. “베이지안 확률통계와 GIS를 연계한 기후변화 도시홍수 리스크 평가: 서울시 서초구를 대상으로”, 「한국지리정보학회지」, 19(4): 36-51.
Lee, S. H., Kang, J. E., Park, C. S., 2016, “Urban Flood Risk Assessment Considering Climate Change Using Bayesian Probability Statistics and GIS: A Case Study from Seocho-Gu, Seoul”, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 19(4): 36-51.

29. 최현일·박승용·송재하·박무중, 2013, “다기준의사 결정기법을 이용한 홍수위험지구 선정”, 「한국방재학회지」, 13(2): 237-243.
Choi, H. I., Park, S. Y., Song, J. H., Park, M. J., 2013. “Identification of Flood Risk Areas using a Multi-criteria Decision Making Method”, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(2): 237-243.
30. 한국방재학회, 2017. 「도시계획과 방재」, 파주: 예문사.
Korean Society of Hazard Mitigation, 2017, *Urban Planning & Disaster Prevention*, Paju: Yeamoonisa press.
31. 행정안전부, 2016, 「재해연보」, 세종.
Ministry of the Interior and Safety, 2016. *Disasters Report*, Sejong.
32. ARMONIA, 2007, *Assessing and mapping multiple risk for spatial planning: approaches, methodologies and tools in Europe*. Italy.
33. Bowering, E. A., Peck, A. M., Simonovic, S. P., 2014. “A flood risk assessment to municipal infrastructure due to changing climate part I-methodology”. *Urban Water Journal*. 11(1): 20-30.
34. Climate change and Urban Vulnerability in Africa, 2012. *An integrated multi-risk framework: considering climate change impacts on African cities*. Italy.
35. Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2012. *The UK Climate Change Risk Assessment: Government report*. UK.
36. Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2012. *Method for undertaking the CCRA Part II-detailed method for stage 3: Assess risk*, UK.
37. Downing, T. E., Butterfield, R., Cohen, S., Huq, S., Moss, R., Rahman, A., Sokona, Y., Stephen, L., 2001. *Vulnerability Indices: Climate Change Impacts and Adaptation*, UNEP Policy Series, Nairobi: UNEP.
38. Elisabeth Bowering et. al., 2011. *City of London: Vulnerability of Infrastructure to Climate Change Final Report*, London: Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario.
39. FEMA, 2012. *Multi-hazard Loss Estimation methodology Flood Model. HAZUS-MH MR3 Technical Manual*, U.S.A:FEMA
40. IPCC, 2007, *Climate Change 2007: Impact, adaptation and vulnerability*, UK: Cambridge university press.
41. IPCC, 2014, *Climate Change 2014: Impact, Adaptation and Vulnerability*, UK: Cambridge university press.
42. IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report Summary for Policy makers*, UK: Cambridge university press.
43. ISO/IEC 31010, 2009. Risk management : Risk assessment techniques. Geneva: ISO.
44. Jones, R., Boer, R., 2003. *Assessing current climate risks Adaptation Policy Framework: A Guide for Policies to Facilitate Adaptation to Climate Change*, U.S.A: UNDP.
45. Jones, R.N., Preston, B.L., 2011. “Adaptation and risk management”, *WIREs Climate Change* 2(2): 296-308.
46. Levina, E., Tirpak, D. 2006. *Key Adaptation Concepts and Terms*, OECD.
47. Lissner, T. K., Holsten, A., Walther, C., Kropp, J.P., 2012. “Toward sectoral and standardised vulnerability assessment: the example of heatwave impacts on human health”, *Climate change*, 112(3-4): 687-708.
48. Moss et al., 2001. *Vulnerability to climate change: a quantitative approach*, Prepared for the US Department of Energy. Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory.
49. Smith, K., 2013. *Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster 6th edition*, US: Routledge.
50. Subtil F., Rabilloud M., 2015. “An enhancement of ROC curves Made them clinically relevant

- for diagnostic-test comparison and optimal threshold determination”, *Journal of Clinical Epidemiology*, 68(7): 752-759.
51. U.N. Department of Humanitarian Affairs, 1992. *Internationally Agreed Glossary of Basic Terms Related to Disaster Management*, Geneva: United Nations Department of Humanitarian Affairs.
52. UNDP, 2005. *Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policy and measure*, U.S.A.: Cambridge University Press.
53. UNESCO-IHE Institute for water education, 2012. *A Conceptual Framework for Comprehensive Assessment of Risk Prevention Measures: The KULTURisk framework (KR-FWK)*, Delft.
54. Urban Land Institute, 2015. *A guide for assessing climate change risk*, DC.

Date Received 2017-11-04
 Reviewed(1st) 2018-01-09
 Date Revised 2018-05-24
 Reviewed(2nd) 2018-08-01
 Date Accepted 2018-08-01
 Final Received 2018-08-08