

공통사회경제경로 기후변화 시나리오 기반 고해상도 홍수 리스크 평가

유인상* · 김현규**† · 박진택*** · 정휘철****

*전남연구원 공간환경연구실 부연구위원, **한국환경연구원 국가기후위기적응센터 부연구위원,
한국환경연구원 국가기후위기적응센터 연구원, *한국환경연구원 국가기후위기적응센터 선임연구위원

High-resolution flood risk assessment using Shared Socioeconomic Pathway (SSP) climate change scenarios

Yu, Insang* · Kim, Hyungyu**† · Park, Jintaek*** and Jung, Huicheul****

*Associate Research Fellow, Department of Spatial & Environment Planning, Jeonnam Research Institute, Naju, Korea

**Research Fellow, Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute, Sejong, Korea

***Researcher, Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute, Sejong, Korea

****Chief Research Fellow, Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute, Sejong, Korea

ABSTRACT

This study assessed flood risk in South Korea according to Shared Socioeconomic Pathway (SSP) scenarios, applying a definition of climate change risk derived from the Intergovernmental Panel on Climate Change. The number of districts exposed to high flood risk will increase in the future under a high-carbon emission scenario (SSP5-8.5). Fourteen (4%) districts were considered to have high flood risk during the baseline period (2001 ~ 2020), but this number is projected to increase to 76 (33%) in 2021 ~ 2040 and 96 (42%) in 2041 ~ 2060, out of 229 districts. Findings of this study highlight the importance of transitioning to low-carbon scenarios, as the number of high-risk districts decreases over time with SSP1-2.6. It was found that future high flood risk is driven by increases in the number of days with more than 500mm of daily precipitation in vulnerable districts. Additionally, some vulnerable areas have annual maximum precipitation ranging from 200 mm to 500 mm, but the design rainfall (threshold) of rivers and urban is lower than this value. The results of this study provide crucial information for national and local governments in the process of constructing climate change adaptation plans. These findings can assist governments in prioritizing financial support to accelerate climate change adaptation and reduce disaster risk, as well as improve design standards for flood protection in riverine and urban areas to reflect future climate change trends. Local governments can use the findings to make informed decisions when selecting appropriate adaptation measures by analyzing high-risk regions and indicators for adaptation policy and infrastructure development.

Key words: Flood, Risk Assessment, SSP, Climate Change, Adaptation, Indicator

1. 서론

전 세계적으로 기후와 물 관련 재해로 인해 많은 인명과 재산 피해가 발생하고 있다. 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)에 따르면 1970년부

터 2019년까지 전 세계적으로 기후 또는 물 관련 재해가 11,000건 이상 보고 되었으며, 이로 인해 약 200만 명 이상의 사망자와 3.64조 달러의 손실이 발생한 것으로 나타났다(WMO, 2021). 이를 일 단위로 환산하면 하루 평균 115명이 사망하고, 약 2억 200만 달러의 손실이 발생한 것과 같다. 한국에서도 기상현상으로 인한 물 관련 재해

†Corresponding author : hgkim@kei.re.kr (Bldg. B-512, KACCC, 411, Hannuri-daero, Sejong, 30145, Korea. Tel. +82-44-415-7419)

ORCID 유인상 0000-0002-8127-4892
김현규 0000-0003-2350-3244

박진택 0009-0005-3331-6081
정휘철 0000-0002-1908-342X

는 많은 피해를 발생시키고 있다. 행정안전부에서 발간하는 재해연보에 따르면, 2010년부터 2019년까지 주요 자연재해 원인별 피해액은 태풍 1조 9,063억원(53.8%), 호우 1조 2,412억 원(35.2%), 폭설 2,248억 원(6.5%)인 것으로 나타났다(MOIS, 2020). 이 중 홍수를 유발하는 태풍과 호우가 차지하는 비율이 총 피해 금액의 89%로, 홍수 관련 피해가 대부분을 차지하고 있다. 기후변화로 인해 홍수와 같은 물 관련 재해는 앞으로 더욱 커질 것으로 전망된다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 제6차 평가 보고서(AR6)를 통해 지구 온도가 1.5°C 보다 2°C 상승했을 때 홍수로 인한 피해가 1.4~2.0배 증가하고, 3°C 상승하면 2.5~3.9배 증가할 것으로 전망했다. 특히, 지구 온난화가 4°C에 도달하면 전 세계 육지 면적의 약 10%에서 극한 강우와 가뭄 발생 가능성이 모두 증가할 것으로 전망했다(IPCC, 2022).

홍수와 폭염, 가뭄, 산사태와 같은 기후 관련 자연재해 리스크를 저감하기 위해 우리나라 중앙 및 지방 정부는 5년 마다 기후위기 적응대책을 수립하고 있다. 효과적인 적응대책 수립을 위해 기후변화 리스크 평가 결과를 활용하여 조치가 필요한 지역의 우선순위를 결정하는 것은 매우 중요하다. 중앙 정부는 지방 정부가 기후 위기 적응 대책을 효과적으로 수립할 수 있도록 물적, 재정적으로 지원하는 역할을 수행하기 때문에 전국 범위의 행정구역 단위 리스크 평가가 필요하다. 전국을 대상으로 고해상도 리스크를 분석하는 데는 시간적, 경제적 제약이 있으므로, 행정구역의 대응변수를 사용한 지표 기반 리스크 평가 방법이 널리 이용되어 왔다(Chen et al., 2020; Dabanli, 2018; Ferrazzi et al., 2021; Gregor-Gaona et al., 2021; Quesada-Román, 2021, 2022; Santos et al., 2020; Sun et al., 2019). 지방 정부는 위험지역에 구조적, 비구조적, 제도적 적응대책을 계획하고 이행하는 업무를 수행하므로 고해상도 리스크 평가 방법이 적절하다(Hu et al., 2017; Kappes et al., 2012; Mazzorana et al., 2014; Rubio et al., 2020; Uhe et al., 2019; Usman Kaoje et al., 2021; Yu, 2017). 환경부는 지방 기후위기 적응대책 수립 지원을 위해 기후변화 취약성 평가 도구(VESTAP)를 통해 취약성 평가 결과와 지도를 지방 정부에 제공하고 있다. 그러나 행정구역별로 결과가 표출되어 지방 정부가 활용하기에 한계가 있어 고해상도 공간정보 활용이 요구된다.

본 연구는 공통사회경제경로(Shared Socio-economic Pathways, SSP) 기후변화 시나리오에 따른 우리나라의 홍수 리스크를 평가하고 시·공간적인 리스크의 변화 양상과

지역별 원인을 분석하였다. 특히, 중앙 및 지방 정부가 기후위기 적응대책 수립을 위해 효과적인 의사결정을 할 수 있도록 방법론을 정립하고 적용하였다. 지방 정부를 위해 격자 단위 물리적 홍수 모델링 결과, 점 단위 건축물, 격자 단위 인구 및 토지피복도와 같은 고해상도 공간정보를 활용하여 공간적으로 상세화된 위험지역을 선정하였다. 중앙 정부를 위해 고해상도 공간정보를 행정구역 단위로 지표화하여 리스크 평가 결과를 행정구역 단위로 표출하였다. IPCC 제6차 평가 보고서에서 활용한 SSP 기후변화 시나리오를 활용하였고 이 중 저탄소 시나리오인 SSP1-2.6(2100년 CO₂농도 432 ppm)과 고탄소 시나리오인 SSP5-8.5(2100년 CO₂농도 1,089 ppm)를 적용하였다. 시간범위는 기준연도를 2001~2020년, 미래연도 중 근미래를 2021~2040년, 중미래를 2041~2060년으로 결정하였다.

본 연구 결과는 국가 및 지방 정부 기후위기 적응대책 수립과 기후변화 영향평가에 활용 될 수 있을 것으로 판단된다. 중앙 정부는 전국 홍수 리스크 지도를 활용하여 지방 정부의 재정 지원을 위한 기초자료로 활용할 수 있고 국가 차원에서 적응대책이 필요한 행정구역의 우선순위를 결정할 수 있다. 지방 정부는 고해상도 홍수 리스크 관련 공간정보를 활용하여 행정구역 내 홍수 리스크 저감을 위한 구조적, 비구조적, 제도적 적응대책 수립 우선 지역을 선정할 수 있을 것으로 기대된다. 홍수 리스크 지도는 고해상도 공간정보를 활용하여 구축되어 중앙 및 지방 정부가 상호 연계된 기후 위기 적응대책을 수립하는데 기여할 것으로 판단된다.

2. 기후변화 리스크 개념

기후변화에 의한 홍수 리스크 평가를 위해 리스크의 개념에 대해 조사하였다. 다양한 과학 문헌에서 기후변화 리스크에 대해 다루고 있으나 각 연구마다 리스크에 대한 개념과 평가 방법은 다양하다(Marin-Ferrer et al., 2017). 기후변화 관련 대표적인 국제조직인 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)가 기후변화 평가 보고서를 통해 체계화된 리스크 개념을 제시하였다. IPCC 5차 평가 보고서(AR5)와 이어져 출판된 6차 평가 보고서(AR6)는 기후변화 리스크를 위해성(hazard), 노출성(exposure), 취약성(vulnerability)의 상호작용에 의해 산출되는 결과로 정의하였다(IPCC, 2014). 유럽집행위원회(European Commission, EC)도 재해 위험 분석 도구인 INFORM을 통해 IPCC와 유사하게 기후변화

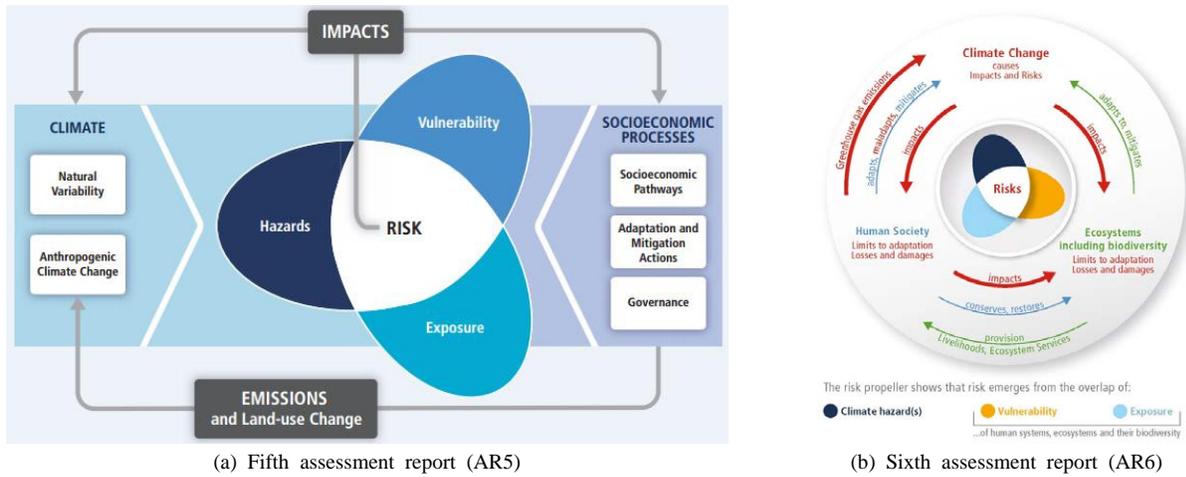


Fig. 1. Illustration of the fundamental concept of risk to climate change (IPCC, 2014, 2022)

리스크를 위해성, 노출성, 취약성, 대응능력의 상호작용으로 정의하였다(Bollin et al., 2003; Davidson, 1997; De Groeve et al., 2014a, 2014b, 2015).

본 연구는 IPCC가 정의한 내용을 바탕으로 기후변화 리스크를 위해성, 노출성, 취약성의 상호작용으로 인해 시스템에 발생하는 부정적인 결과로 정의하였다. 기후변화 리스크를 구성하는 세 가지 요소(Fig. 1) 중 위해성은 기후변화에 의한 인명피해, 재산 손실 등을 초래할 수 있는 사건의 발생 가능성과 규모를 나타내고, 노출성은 피해대상 규모로 위해성에 의해 영향을 받거나 영향을 받을 수 있는 지역에 위치한 인구와 건축물, 인프라 등의 규모로 나타낸다(IPCC, 2014). 세 번째 요소인 취약성은 기후변화로 인한 부정적인 영향을 변화시킬 수 있는 자연적(지형적, 환경적) 또는 인위적(재정적, 행정적, 정책적) 요소로 기후변화 민감도와 적응능력 수준 등 다양한 개념을 포함하고 있다.

3. 연구방법 및 자료

기후변화에 의한 홍수 리스크 평가를 위해 IPCC에서 제안한 리스크의 개념을 적용하여 Fig. 2에 제시한 연구 절차에 따라 연구를 수행하였다. 먼저 리스크를 구성하고 있는 위해성, 노출성, 취약성의 개별지표 목록을 작성하고 각각의 가중치를 산정하였다. 기후변화 시나리오, 고해상도 홍수 및 인구 지도 등, 민감도 및 적응능력 DB를 구축하고 활용하여 개별지표를 산정하였다. 그 후 개별지표를 표준화하고 입력자료로 활용하여 행정구역 단위 리스크

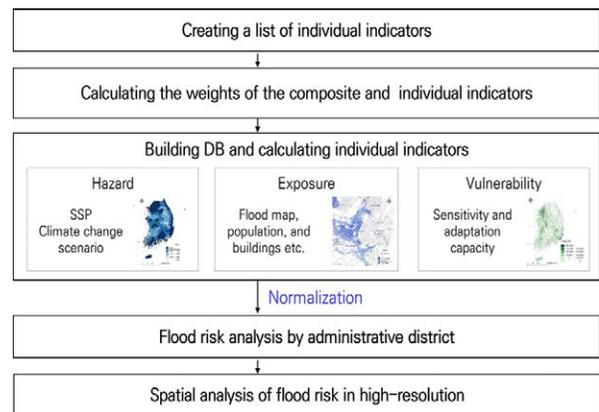


Fig. 2. Research procedure

를 산정하였다. 마지막으로 고해상도로 구축한 노출성 공간정보 분석을 통해 행정구역 내에서 홍수에 위험한 지역을 분석하였다.

3.1. 지표 목록 구축

기후변화에 따른 홍수 리스크 분석을 위해 위해성, 노출성, 취약성에 대한 개별지표 구축이 필요하다. 지표구축은 문헌조사와 분야별 전문가 토론을 통해 진행되었다. 문헌조사에서는 기존 연구를 바탕으로 요소별 개별지표를 조사하고, 토론에서는 문헌조사 단계에서 구축한 개별지표 목록을 바탕으로 DB 구축 가능성, 적정성, 대체가능 지표 등을 논의해 최종적으로 지표를 확정하였다(Table 1). 문헌조사 결과, 기존 연구에서는 위해성 지표로서 단순히 강우가 많이 내리는 양상을 나타내는 지표가 주를 이

Table 1. Indicators and their weights for flood risk assessment

Composite indicators		Individual indicator		
Division	Weight	Sign	Weight	Name
Hazard	0.35	H1	0.34	Ratio of historical and projected rainfall to 50% design rainfall* of river basin (Historical and projected rainfall /design rainfall, dimensionless) *50% of design rainfall corresponding to the river flood warning standard of the Korea Ministry of Environment
		H2	0.23	Days of historical and projected rainfall in excess of the design rainfall of river basin (historical and projected rainfall > design rainfall, days)
		H3	0.15	Ratio of historical and projected rainfall to design rainfall of urban watershed (Historical and projected rainfall /design rainfall, dimensionless)
		H4	0.18	Days of historical and projected rainfall in excess of the design rainfall of urban watershed (historical and projected rainfall > design rainfall, days)
		H5	0.10	Mean annual maximum rainfall of historical and projected period (mm)
Exposure	0.34	E1	0.32	Area of building exposed to flood risk area (m ²)
		E2	0.12	Area of agriculture exposed to flood risk area (m ²)
		E3	0.18	Area of road exposed to flood risk area (m ²)
		E4	0.38	The number of people living on flood risk area (people)
Vulnerability	0.31	V1	0.32	Ratio of flooded area in the past (Flooded area / administrative district area, %)
		V2	0.19	Ratio of impervious area (Impervious area / administrative district area, %)
		V3	0.32	Ratio of built embankment length (built embankment length / planned embankment length, %)
		V4	0.17	Ratio of old sewer length (Sewer length over 10 years old / sewer length, %)

루었다. 이 지표들은 누적 평균 3일 최대 강우량(Zhang et al., 2020), 일 강우량(Allafta and Opp, 2021; Nasiri et al., 2019), 강우일 수 등이 있다. 이 지표들에 대한 토론 결과, 강우량이 높더라도 홍수방어를 위한 적응역량이 높은 지역은 피해 발생 가능성이 적고, 강우량이 낮더라도 대응이 잘 되어 있지 않으면 큰 피해가 발생할 수 있다는 의견이 제기되었다. 이에 따라, 미래의 강우량이 홍수 방어를 위한 구조물의 설계강우량(임꺽값)을 얼마나 자주 또는 많이 초과하는지 나타낼 수 있는 지표를 선정할 필요가 있다. 또한, 노출성 개별지표에 대한 문헌조사 결과, 지역별 인구밀도(Bigi et al., 2021; Nasiri et al., 2019; Zhang et al., 2020), 주택 수(Sharma et al., 2018), 산업체 수(Zhang et al., 2020), 상업 건축물 수, 도시지역 면적, 녹지 면적(Bigi et al., 2021)과 같은 행정구역 통계자료를 주로 활용하였다. 홍수는 행정구역 전체에 발생하지 않고 일부 취약 지역에 발생하기 때문에 고해상도의 공간정보 분석을 통해 홍수 위험지역 또는 저지대에 위치한 노출 규모를 산정할 필요가 있다는 의견이 제기되었다. 취약성 개별지표에 대한 문헌조사 결과, 지역 내 총 생산(GRDP), 재정자립도, 실업률(Sharma et al., 2018) 등이 활용되었다. 이 지표들은 홍수 리스크에 직접적으로 영향을 미치

지 않고 중앙 및 지방 정부의 기후위기 적응노력으로 변화시키는데 한계가 있는 지표들이다. 이에 따라, 홍수에 직접적으로 영향을 미치며 기후위기 적응대책 수립을 통해 리스크 저감효과를 나타낼 수 있는 개별지표의 필요성이 논의되었다.

3.2. 지표 가중치 산정

지표의 가중치 산정 방법은 의사결정 방법론과 통계적 방법론으로 구분된다. 의사결정 방법은 Multi-Attribute Utility Theory, Analytic Hierarch Process, Fuzzy Set Principle, Delphi Technique 등이 있고 통계적 방법은 Factor Analysis, Principal Component Analysis, Probit Model 등이 있다. 두 방법론 중 종합지표와 개별지표의 가중치 산정 방법으로 전문가 의견을 기반으로 결과를 도출하는 의사결정 방법론이 널리 활용되고 있다. 의사결정 방법론 중에서도 계층화분석(Analytic Hierarchy Process, AHP)에 의해 가중치를 산정하는 연구가 주로 진행되어 왔다. AHP는 의사결정자의 경험을 중요시하기 때문에 계량적인 정보뿐만 아니라 의사결정에서 다루기 곤란한 질적인 정보를 비교적 쉽게 처리할 수 있는 장점이 있다.

AHP는 간편하고 명확한 이론을 근거로 의사결정이 요구되는 다양한 문제에 적용할 수 있는 범용적 모델이다. 이에 본 연구에서는 종합 및 개별지표의 가중치 산정을 위해 여러 의사결정 방법 중 AHP를 적용하였다. AHP 분석을 위한 설문조사를 위해 홍수, 기후변화, 리스크 평가 연구에 10년 이상의 경력을 갖고 있는 학계, 국가기관, 산업계 등의 전문가 9인을 선정하여 가중치를 산정하였고 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

위해성, 노출성, 취약성 종합지표의 가중치는 각각 0.35, 0.34, 0.31로 산정되어 위해성, 노출성의 영향력이 높은 것으로 나타났으나 서로 큰 차이를 보이지는 않았다. 위해성 중에 국가 및 지방하천의 설계강우량 초과 빈도와 강도를 나타내는 100년 빈도 설계강우량 대비 연 최대 강우량 비율(H1)과 100년 빈도 설계강우량 50% 초과 강우 일 수(H2) 개별지표의 가중치가 각각 0.34, 0.23으로 높게 산정되었다. 반면, 소하천 및 도시지역의 설계강우량 초과 빈도와 강도를 나타내는 방재성능목표강우량 대비 강우량 비율(H3), 방재성능목표 강우량 초과 강우 일 수(H4) 개별지표의 가중치는 각각 0.15, 0.18로 비교적 낮게 산정되었다. 지역의 방재역량 임곗값 없이 강우가 많이 내리는 양상을 나타내는 연 최대 일 강우량(H5) 개별지표의 가중치가 가장 낮은 0.10으로 산정되어 임곗값 적용의 중요성을 확인할 수 있었다. 노출성 개별지표의 가중치는 홍수 위험지역에 위치한 인구(E4), 건축물(E1), 도로(E3), 농업지역 면적(E2) 순으로 높게 산정되었고 그 값은 각각 0.38, 0.32, 0.18, 0.12이다. 인명피해와 관련된 인구, 건축물 지표의 영향력이 비교적 높게 산정되었다. 취약성 개별지표의 가중치는 과거 홍수 피해지역 면적 비율(V1), 하천개수율(V3), 불투수 면적 비율(V2), 노후 하수관로 비율(V4) 순으로 높게 산정되었고 그 값은 각각 0.32, 0.32, 0.19, 0.17이다. 상습 침수지역을 나타내는 민감도 관련 지표와 하천 제방과 관련된 적응능력 관련 지표가 비교적 높게 산정되었다.

3.3. 위해성(Hazard) 구축

홍수위험 발생 빈도와 강도를 나타내는 위해성 종합지표 (composite indicator)는 5개의 개별지표(individual indicator)를 활용해 구축하였다. 설계강우량(100년빈도) 대비 연 최대 강우량 비율(H1)과 설계강우량(100년빈도) 50% 초과 강우 일 수(H2) 개별지표는 국가, 지방하천의 설계강우량을 임곗값으로 활용하여 지역별 하천홍수 방어능력을 초

과하는 외수침수 발생 강도와 빈도를 나타내는 지표이다. 방재성능목표강우량 대비 강우량 비율(H3)과 방재성능목표 강우량 초과 강우 일 수(H4) 개별지표는 도시, 소하천의 방재성능목표강우량을 임곗값으로 활용하여 도시 침수 방어능력을 넘어서는 침수발생 강도와 빈도를 나타내는 지표이다. 연 최대 일 강우량(H5)은 하천 및 도시 유역의 방어 수준을 고려하지 않은 지표로서 지역에서 발생할 수 있는 연 최대 강우량이다.

위해성 개별지표 산정을 위한 원시자료(raw data)로 기준연도와 미래연도의 일강우량, 시간 강우량 등 기후자료와 지역별 홍수 리스크 임곗값을 활용하였다. 위해성 개별지표 구축에 사용한 모든 원시자료의 공간 해상도는 서로 다르지만 해상도를 통일하기 위해 229개 행정구역 단위로 변환하여 지표를 산정하였다. 기준연도(2001 ~ 2020년)의 일 강우량과 시 강우량은 20년 이상의 기상자료를 보유한 종관기상관측소(ASOS) 72개로부터 구축하였다. 홍수 리스크 임곗값은 국가 및 지방하천의 설계강우량, 도시지역 및 소하천의 설계강우량인 방재성능목표강우량을 활용하였다. 설계강우량은 환경부에서 제공하는 기상관측소별 100년 빈도 확률강우량을 티센 네트워크(Fig. 3)에 의한 면적가중 평균 방법을 통해 229개 행정구역별로 산정하였다(Fig. 4). 한편, 환경부는 615개 종관기상관측소와 방재기상관측소(AWS)의 연 최대 강우량을 지역빈도 분석하여 재현기간별 확률강우량을 제공하고 있다. 다만, 환경부는 울릉군의 확률강우량은 제공하고 있지 않아 지점 강우빈도 분석을 통해 확률강우량을 추정하였다.

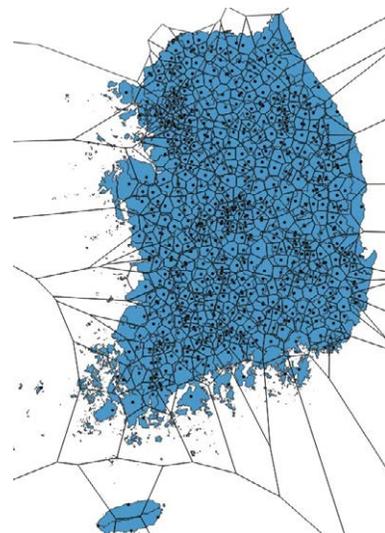


Fig. 3. Thiessen network of meteorological station

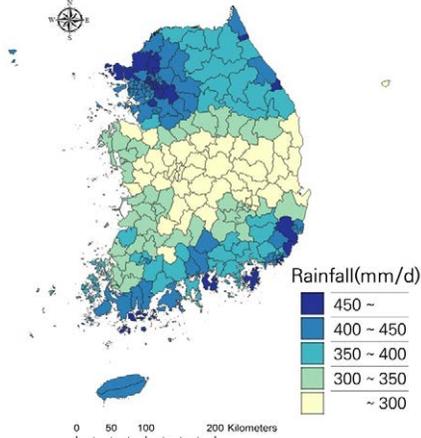


Fig. 4. Design rainfall of river (100-yr rainfall, threshold)

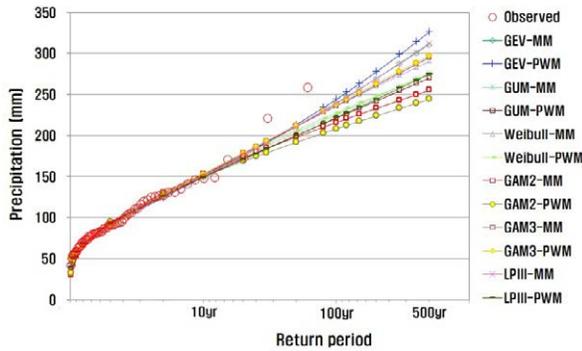


Fig. 5. Probability rainfall in Ulleung by probability distribution and parameter estimation method

1960년 ~ 2020년까지의 연 최대 강우량을 활용하여 강우 빈도 분석을 수행하였다. 적용한 확률분포는 극치분석에 적합한 GEV, Gumbel, Weibull, 2변수 Gamma, 3변수 Gamma, Log-Pearson TypeIII이고 매개변수 추정방법은 모멘트법과 확률가중모멘트법이다. 적합도 검정 결과, 울릉도 연 최대치 강우량에 GEV와 Gumbel 분포가 적합하였고 환경부의 홍수량 산정 표준지침에 따라 모멘트법에 의한 Gumbel 분포 결과를 활용하여 울릉도의 설계(확률) 강우량을 산정하였다(Fig. 5). 도시지역 및 소하천의 설계

강우량은 행정안전부에서 고시한 행정구역별 1시간 지속 시간 방재성능목표강우량을 활용하였다.

미래기간의 기후자료는 기상청에서 제공하고 있는 HadGEM3-RA 모델에 의한 1 km 공간해상도의 남한상세 일 강우량 자료를 활용하였고 공간해상도를 통일하기 위해 공간 평균하여 229개 행정구역 단위로 변환하여 H1, H2 지표를 산정하였다. H3, H4 지표 산정을 위해 필요한 1시간 지속시간 최대 강우량은 24시간 지속시간 최대 강우량으로부터 도출되었다. 기상관측소별 과거기간(2001 ~ 2020년)의 24시간 지속시간 연 최대 일 강우량과 연 최대 일 강우량이 발생한 일자의 1시간 지속시간 최대 강우량을 구축하고 두 강우량 간의 비율을 지역별로 산정하여 미래기간에 적용하였다. 이 방법에 대해 여러 전문가와 토론을 하였고 과거의 강우 패턴을 그대로 미래에 적용하는 것이 한계로 지적되었으나 미래 시 강우량을 제공하지 않는 현시점에 적용 가능한 방법으로 결론지었다. 기후변화 시나리오는 저탄소 시나리오인 SSP1-2.6과 고탄소 시나리오인 SSP5-8.5를 적용하였다. 기준연도와 미래연도의 기후변화 시나리오별 위해성 종합지표(H)와 개별지표(H1 ~ H5) 산정 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

3.4. 노출성(Exposure) 구축

홍수 위험에 노출되는 대상의 규모를 나타내는 노출성 종합지표는 네 개의 개별지표를 활용해 구축하였다. 네 개의 개별지표는 홍수 위험지역에 위치한 건축물(E1), 농업지역(E2), 도로(E3), 인구(E4)가 포함 된다¹⁾. 홍수 위험 관련 노출성 지표를 구축하기 위해 우선 홍수 위험지역을 정의하였다. 본 연구에서는 홍수 위험지역을 국가와 지방 하천의 홍수 방어 구조물 설계를 위한 100년 빈도 홍수위(flood water level)보다 낮은 지역으로 정의 하였다. 따라서 건축물, 농업지역, 도로, 인구 등이 하천 계획 홍수위보다 낮은 지역에 위치하고, 그 규모가 커질수록 홍수에 노출될 가능성이 높아진다.

노출성 개별지표 산정을 위한 원시자료로 폴리곤(polygon) 형태인 환경부의 100년 빈도 홍수위험지도, 국토부 브이월드(V-WORLD)의 건축물 및 도로 지도, 국토정보플랫폼의 100 m 격자 인구 지도, 래스터(raster) 형태인 환경부

1) 우리나라의 최근 10년간(2010 ~ 2019년) 홍수 피해액은 공공시설 1조 8,740억원(87.3%), 건축물 633억원(5.1%), 농경지 501억원(4.0%), 기타 433억원(3.5%), 선박 6억원(0.1%) 순으로 조사되었다. 2019년, 공공시설 피해액은 도로 306억원(20.4%), 하천 270억원(18.0%), 사방시설 246억원(16.4%), 소하천 180억원(12.0%) 순으로 조사되었다 (MOIS, 2020). 홍수의 노출 대상으로 피해액이 높은 공공시설, 건축물, 농경지를 선정하였고 공공시설 중 홍수방어 시설이 아닌 피해대상 시설인 도로를 선정하였다. 또한, 사회적 파급효과가 큰 인구를 피해대상에 포함하였다.

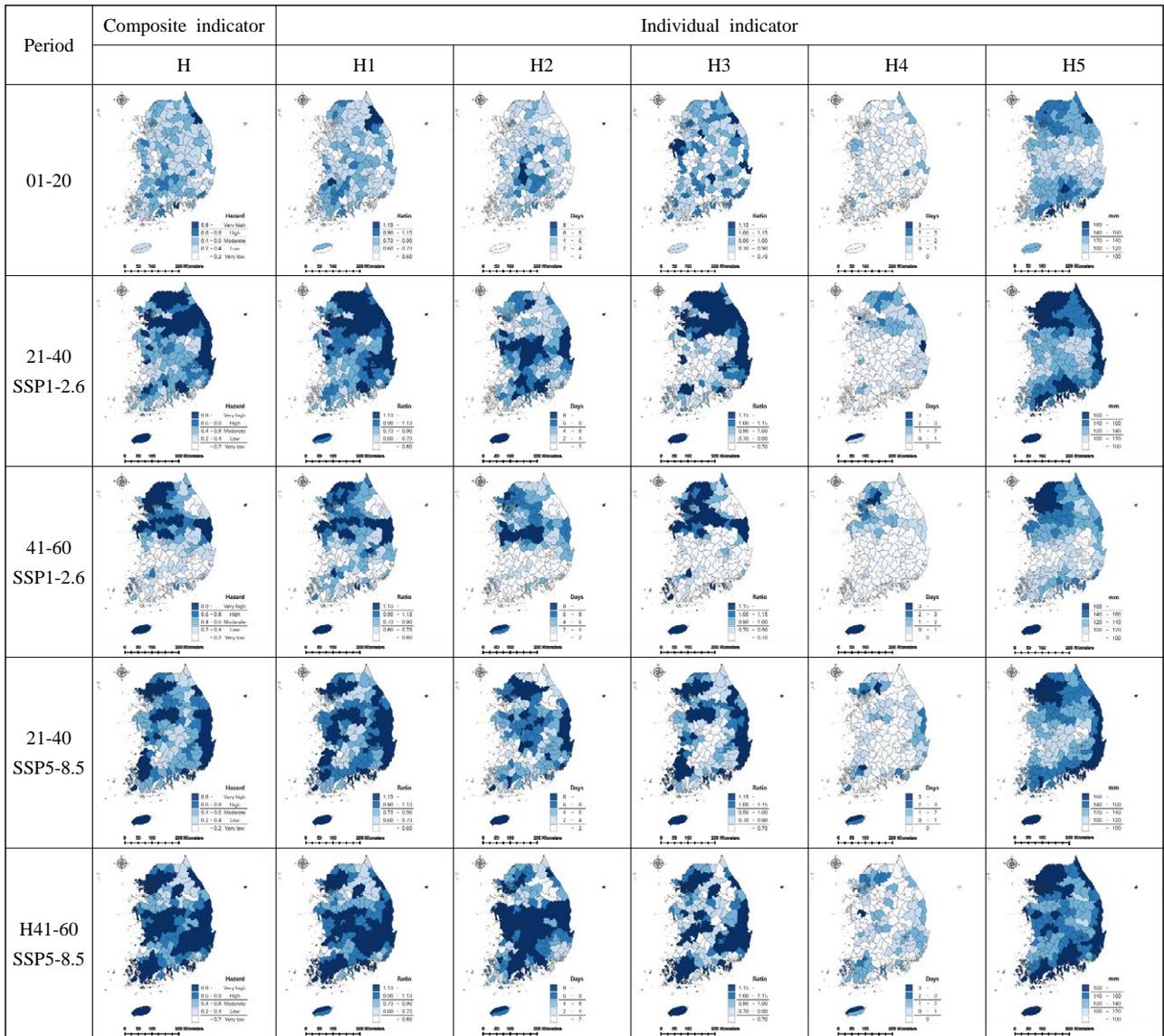


Fig. 6. Mapping composite and individual indicators of hazard in historical and projected period with HadGEM3-RA climate model and SSP1-2.6, 5-8.5 climate change scenario

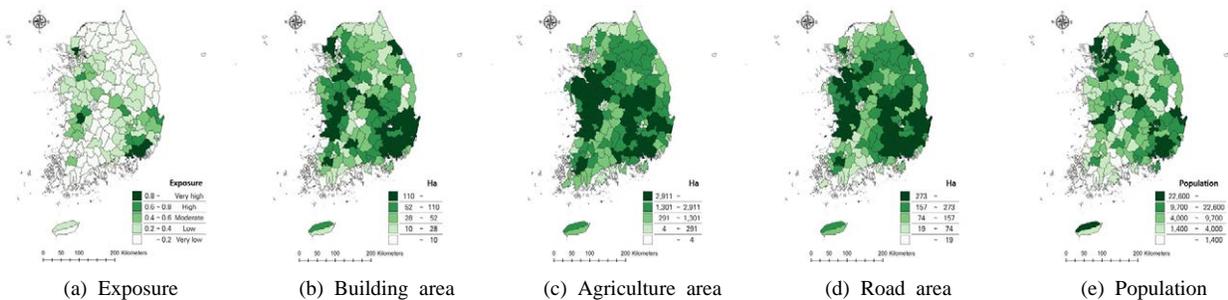


Fig. 7. Mapping composite and individual indicators of exposure

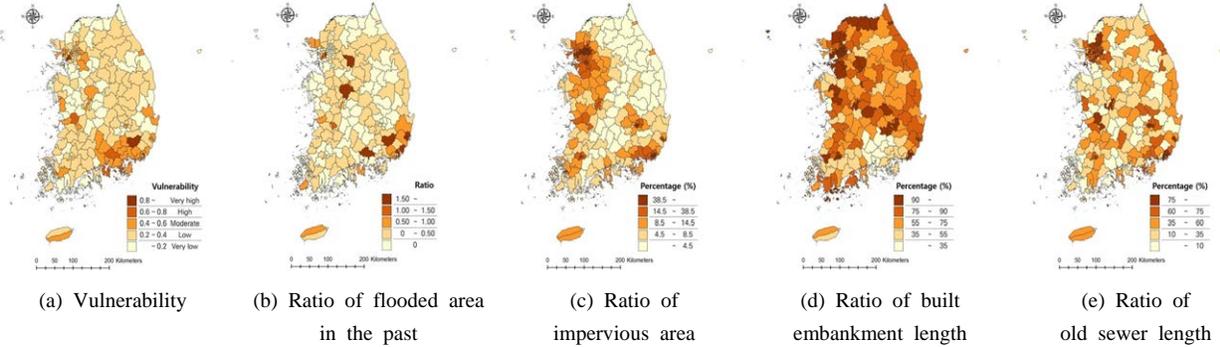


Fig. 8. Mapping composite and individual indicators of vulnerability

환경공간정보서비스 토지피복도의 농업지역 공간정보를 활용하였다. 노출성 개별지표는 홍수위험지도와 각각의 건축물, 농업지역, 도로, 인구 공간정보를 중첩하여 위험 지역에 노출된 홍수 피해 대상의 면적, 인구 등 노출 규모 산정을 통해 구축하였다. 노출성 개별지표 구축을 위한 원시자료의 공간해상도는 서로 다르지만 공간 해상도를 통일하기 위해 229개 행정구역 단위로 변환하여 지표를 산정하였다. 노출성 종합지표 산정 결과, 서부지역, 동남부 지역의 값이 큰 것으로 나타났다(Fig. 7(a)). 이 지역들은 한강, 금강, 낙동강, 영산강 등 국가하천이 위치한 곳으로 홍수 위험지역의 면적이 커 건축물 면적, 농업지역 면적, 도로 면적이 크게 산정된 것으로 분석되었다(Fig. 7(b) ~ (d)). 홍수 위험 인구의 경우 인구밀도가 높은 서울, 부산 인근의 지역이 높은 것으로 나타났다(Fig. 7(e)).

3.5. 취약성(Vulnerability) 구축

지역의 홍수 위험에 취약한 상태를 나타내는 취약성 종합지표는 네 개의 개별지표를 활용해 구축하였다. 네 개의 개별지표는 과거 홍수 피해지역 면적 비율(V1), 불투수 면적 비율(V2), 하천 개수율(V3), 노후하수관로 비율(V4)이다. 취약성 개별지표도 앞서 설명한 위해성과 노출성 지표와 동일하게 원시자료 등을 가공해 229개 행정구역 단위로 구축했으며, 행정구역별 면적 차이로 발생할 수 있는 분석 결과 오류를 제어하기 위해 면적 비율 또는 개수율 등으로 변환해 구축하였다.

과거 홍수 피해지역 면적 비율(V1)은 과거 홍수로 피해가 발생한 지역을 취약성에 반영하기 위한 지표로 행정안전부 침수흔적도를 바탕으로 최근 10년 동안 홍수 피해가 발생한 면적 자료를 구축해 마련하였다. 건물, 콘크리트, 아스팔트 등으로 덮여 빗물이 침투하지 못하는 면적의 비

율을 나타내는 불투수 면적 비율(V2)은 환경부 토지피복도를 활용해 구축하였다. 홍수 피해지역 면적 비율과 불투수 면적 비율은 각각 폴리곤과 레스터 형태로 제공되기 때문에 공간정보 분석을 통해 행정구역별로 개별지표를 산정하였다. 하천에 설치된 제방 길이와 제방 설치가 필요한 하천 길이의 비율을 나타내는 하천개수율(V3)은 통계청 자료를 활용해 구축했으며, 본 연구에서는 하천개수율 값이 높을수록 하천홍수 발생 가능성이 낮아지는 것으로 설정하였다. 마지막 지표는 노후 하수관로 비율(V4)로 환경부 하수도 통계연보를 바탕으로 구축하였다. 노후 하수관로 비율이 높을수록 도시지역의 강우가 원활하게 배제되지 못해 내수침수 발생 가능성이 높아진다. 취약성 종합지표 산정 결과, 수도권 인근, 남동부 지역이 높은 것으로 분석되었다(Fig. 8(a)). 이 지역들은 가중치가 가장 큰 개별지표인 과거 홍수 피해지역 면적 비율(Fig. 8(b))이 높고 하천개수율(Fig. 8(d))이 낮은 지역들이다.

3.6. 홍수 리스크 평가

홍수 리스크 산정을 위해 위해성(hazard), 노출성(exposure), 취약성(vulnerability)의 개별 및 종합지표와 지표별 가중치로 구성된 리스크 산정 공식을 식 (1)과 같이 나타내었다. 리스크 산정 공식은 GIZ and Eurac Research (2017)이 출판한 Vulnerability Sourcebook의 Risk Supplement를 참고하였다. j 지역의 리스크 r_j 는 위해성 H_j , 노출성 E_j , 취약성 V_j 종합지표(composite indicators)에 각각의 가중치인 w_H, w_E, w_V 를 곱한 후 합산하여 산정한다. 산정한 리스크를 식 (2)의 최소-최대 표준화(min-max standardized) 방법을 통해 표준화하여 최종 리스크(R_j)를 산정한다.

$$r_j = H_j \times w_H + E_j \times w_E + V_j \times w_V \quad (1)$$

$$R_j = \frac{r_j - r^{\min}}{r^{\max} - r^{\min}} \quad (2)$$

여기서, j 는 우리나라 전체 행정구역 중 특정 행정구역, r_j 는 표준화 전 리스크, H_j, E_j, V_j 는 위해성, 노출성, 취약성 종합지표, w_H, w_E, w_V 는 종합지표 각각의 가중치이다. R_j 는 표준화 된 최종 리스크, r^{\min}, r^{\max} 는 각각 전체 행정구역의 리스크 값 중 최솟값, 최댓값이다.

위해성, 노출성, 취약성의 종합지표는 여러 개의 개별 지표(individual indicator) i 로 구성된다. j 지역의 종합지표 H_j 는 식 (3)과 같이 개별지표 H_{ij} 에 개별지표별 가중치 w_i 를 곱한 후 서로 더하여 산정한다. 여러 개의 개별지표 수치의 범위와 단위가 서로 달라 종합지표 산정을 위해 식 (4)와 같이 최소-최대 표준화 방법을 통해 표준화한다. 현재 및 미래에 대한 기후변화 리스크 평가와 같이 시간에 종속적인 연구는 현재(기준연도) 기준으로 개별지표의 최솟값과 최댓값을 결정한다.

$$H_j = \sum_{i=1}^n (H_{ij} \times w_i) \quad (3)$$

$$H_{ij} = \frac{h_{ij} - h_i^{\min}}{h_i^{\max} - h_i^{\min}} \quad (4)$$

여기서, i 는 개별지표, H_{ij} 는 표준화 된 j 지역의 i 개별지표, w_i 는 i 개별지표의 가중치, h_{ij} 는 j 지역의 i 개별지표, h_i^{\min}, h_i^{\max} 는 각각 기준연도 기준 전체 행정구역의 i 개별지표 값 중 최솟값, 최댓값 이다. h_{ij} 는 기준연도 또는 미래연도 값이 적용된다. 만약 h_{ij} 가 h_i^{\min} 보다 작으면 H_{ij} 는 0보다 작은 음수, h_i^{\max} 보다 크면 1보다 큰 양수로 산정된다(OECD and EC, 2008).

취약성 평가 가이드라인(Vulnerability SourceBook)은 가장 긍정적인 조건을 가장 낮은 등급으로, 가장 부정적인 조건을 가장 높은 등급으로 나타내는 5등급 체계를 제안한다(GIZ and Eurac Research, 2017). 리스크 산정결과는 Table 2와 같이 0.2 간격으로 매우 낮음, 낮음, 중간, 높음, 매우 높음 5개 등급으로 구분한다.

4. 연구 결과 및 논의

본 장은 3절에서 서술한 리스크 평가 방법을 우리나라에 적용한 결과를 보여준다. 특히 우리나라 홍수 리스크의 시·공간적 변화 분석 결과와 고 위험 행정구역의 종합 및 개별지표 분석을 통한 홍수위험 원인 분석, 지방정부를 위한 고해상도 홍수 리스크 공간정보 활용방안을 제시하였다.

4.1. 홍수 리스크의 시·공간적 변화 분석

기준연도(2001 ~ 2020)와 미래연도(2021 ~ 2060)를 20년 단위로 구분하여 홍수 리스크를 평가하고 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 시간변화에 따른 홍수 위험지역의 변화를 분석하기 위해 리스크 등급이 매우높음 등급(0.8 이상) 이상인 지역을 위험 행정구역으로 정의하였다. 기준연도의 위험 행정구역 수는 14개로 전체 행정구역 수의 6%를 차지하였다. 저탄소 시나리오인 SSP1-2.6에서 홍수위험 행정구역 수는 2021 ~ 2040년 60개(26%), 2041 ~ 2060년 31개(14%)로 전망되었고, 고탄소 시나리오인 SSP5-8.5에서 2021 ~ 2040년 76개(33%), 2041 ~ 2060년 96개(42%)인 것으로 분석되었다(Table 3). 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)에서 미래로 갈수록 홍수위험 행정구역의 수가 감소한 반면, 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서는 증가하여 탄소배출량이 낮은 SSP1-2.6 시나리오로의 전환의 중요성을 확인하였다. SSP5-8.5 기준으로 수도권, 중부지역, 남서부 지역 일부, 남동부 지역 일대의 홍수 리스크가 높은 것으로 전망되었다.

기준연도와 미래연도 중 홍수 리스크가 가장 큰 2041 ~ 2060년(SSP5-8.5)의 리스크를 비교 분석하였다. 미래연도의 리스크에서 기준연도의 리스크를 뺀 값을 Fig. 10(a)와 같이 나타내었다. 파랑색 빗금으로 표시된 지역은 미래에 리스크가 낮아지는 지역, 나머지 지역은 높아지는 지역으

Table 2. Classified risk and severity

Color	Range of risk	Risk classes	Severity
	$0.8 \leq R$	5	Very high
	$0.6 \leq R < 0.8$	4	High
	$0.4 \leq R < 0.6$	3	Intermediate
	$0.2 \leq R < 0.4$	2	Low
	$R < 0.2$	1	Very low

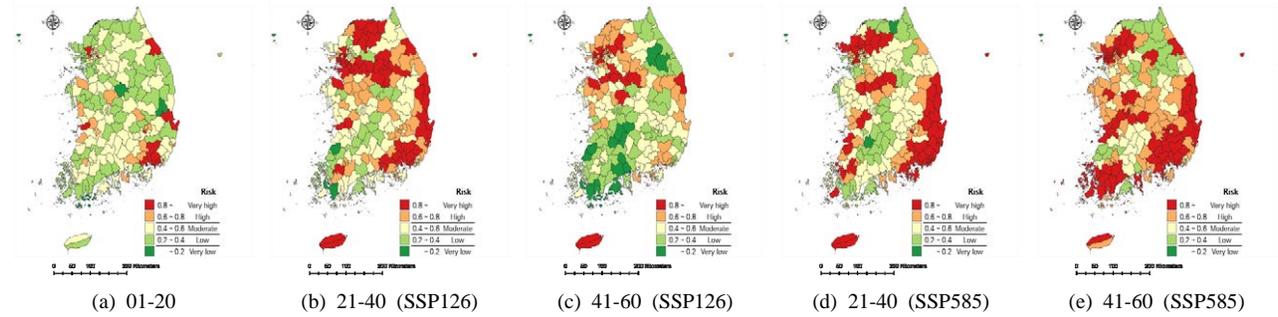


Fig. 9. Changes in spatio-temporal flood risk of historical and projected period under the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios according to administrative districts

Table 3. Changes in the number of administrative districts by severity of flood risk according to SSP climate change scenarios

Severity	2001 ~ 2020		SSP1-2.6				SSP5-8.5			
	Count (No.)	Ratio (%)	2021 ~ 2040		2041 ~ 2060		2021 ~ 2040		2041 ~ 2060	
			Count (No.)	Ratio (%)						
Very high	14	6	60	26	31	14	76	33	96	42
High	25	11	52	23	54	24	46	20	70	31
Intermediate	107	47	88	39	66	28	70	31	43	19
Low	79	34	26	11	62	27	34	15	19	8
Very low	4	2	3	1	16	7	3	1	1	0

로 붉은색에 가까울수록 리스크 증가 폭이 크다. 미래 홍수 리스크가 증가하는 지역은 원인에 따라 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 미래 강우량이 상대적으로 매우 높은 지역으로 서울을 비롯한 수도권 일대, 남서부 지역, 남동부 지역, 동부지역이다(Fig. 10(c), (d)). 이 지역들은 미래 일 강우량이 500 mm 이상으로 전망되어 우리나라의 다른 지역들과 비교하여 매우 높은 수준이다. 두 번째는 중부지역으로 하천 홍수 및 도시 침수 방어를 위한 임곗값이 상대적으로 낮으나 미래 이 지역들에 임곗값을 넘어서는 강우가 발생할 것으로 전망되는 지역들이다. 이 지역들은 미래 일 최대 강우량이 200 ~ 500 mm, 시간 최대 강우량이 100 ~ 160 mm/hr로 상대적으로 매우 높지는 않지만(Fig. 10(c), (f)) 하천설계 강우량이 200 ~ 230 mm, 도시 방재성능목표강우량이 60 ~ 80 mm/hr로 낮은 지역이다(Fig. 10(b), (e)). 과거 30년 간의 연 최대치 강우량 자료의 빈도분석을 통해 하천설계 강우량과 도시의 방재성능목표 강우량이 결정되기 때문에 과거에 이 지역들은 상대적으로 비가 많이 내리지 않은 지역들이었다. 과거에 기

후변화를 고려하지 않고 홍수방어 구조물 설계를 위한 설계강우량을 결정하였으나 기후변화에 의한 미래 강우량의 시공간적 변화 양상을 설계에 반영해야만 기후위기 적응과 회복력 구축이 가능하다는 것을 보여준다. 우리나라에서 홍수방어 구조물의 설계강우량의 개선 업무는 중앙정부의 역할로서 행정구역별 위해성 및 리스크 평가 결과는 중앙정부의 기후위기 적응대책 수립을 위한 의사결정 지원을 위해 활용할 수 있다.

4.2. 고위험 행정구역의 홍수 원인 분석

기준연도와 미래연도의 홍수 리스크를 행정구역별로 평가하였고 홍수 위험지역을 대상으로 리스크 구성 요소인 위해성, 노출성, 취약성의 종합지표를 분석하였다. 홍수 위험지역 선정을 위해 기준연도의 리스크가 높음(high) 등급 이상인면서 고탄소 시나리오인 SSP5-8.5의 중미래(41 ~ 60년) 리스크 역시 높음(high) 등급 이상인 행정구역을 선정하였다. 즉, 현재 홍수 리스크가 높으면서 미래에도 높은 지역을 선정하였다. 그 결과, 38개의 행정구역이

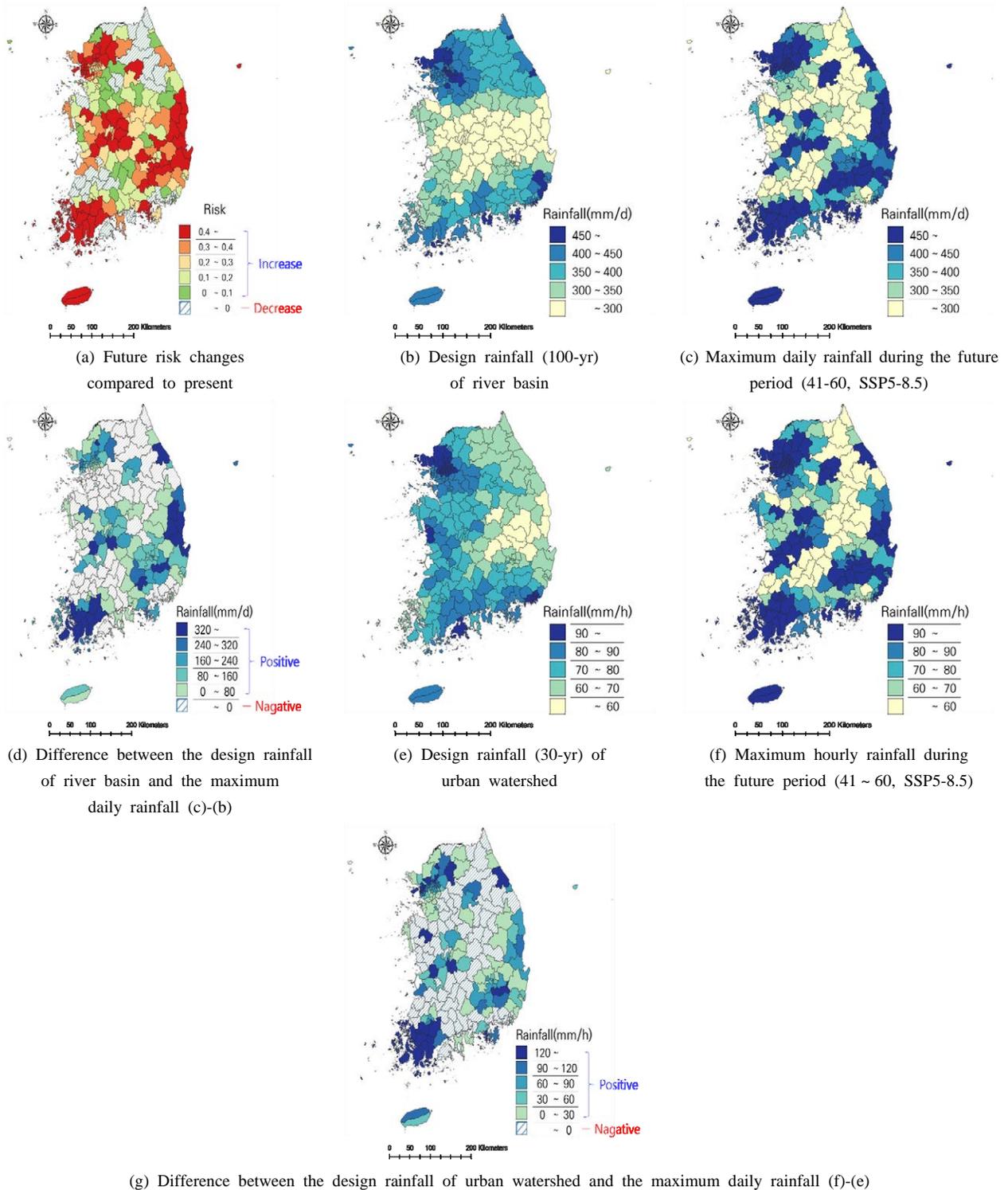


Fig. 10. Characteristics of areas with increased future flood risk through analysis of individual risk indicators

선정되었고 기준연도의 리스크를 기준으로 행정구역을
오름차순으로 정렬하여 Fig. 11에 나타내었다. 홍수 리스
크가 높게 산정된 원인을 분석하기 위해 세 개의 종합지

표 중 가장 수치가 높은 지표를 Fig. 11의 오른쪽 그림과
같이 남색 음영으로 표시하였다. 38개 행정구역 중 17개
지역은 위해성, 14개 지역은 노출성, 5개 지역은 취약성,

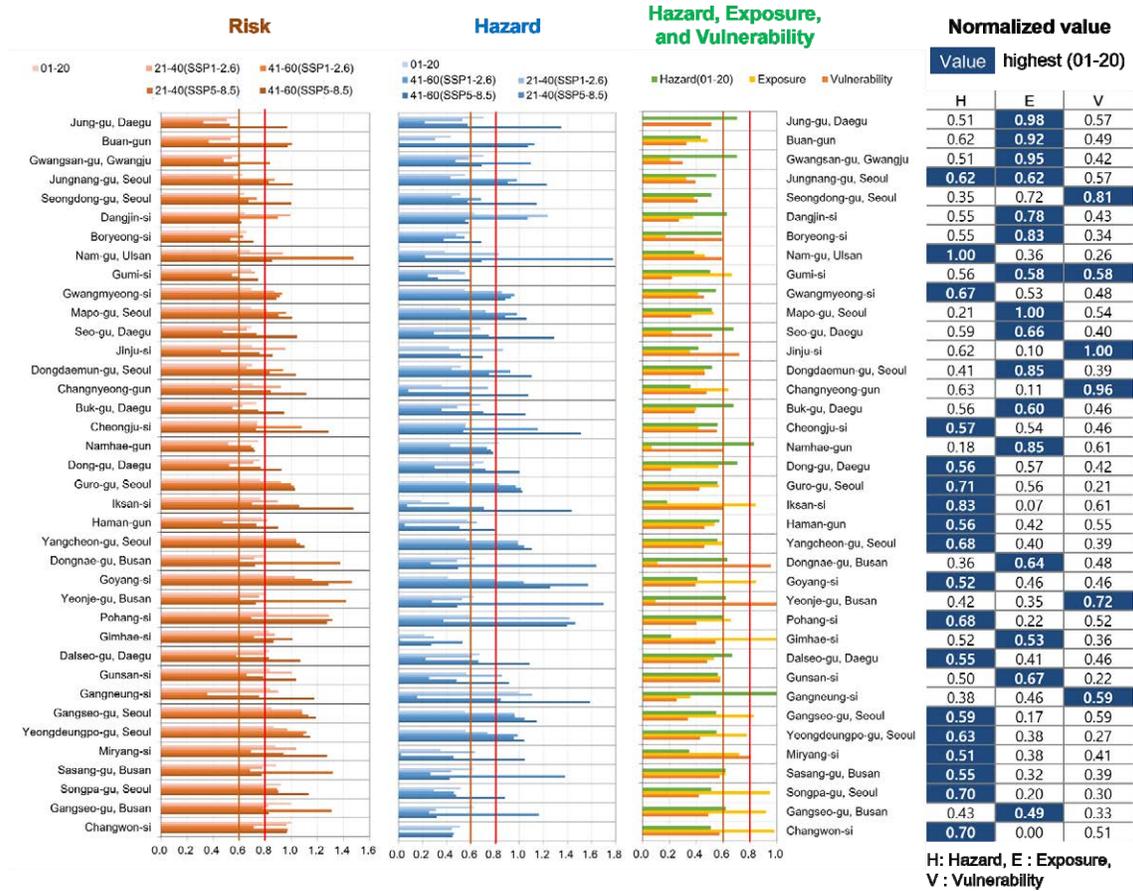


Fig. 11. Flood risk and composite indicators of high-risk areas. Administrative districts are sorted in ascending order based on the flood risk of historical period (2001 ~ 2020)

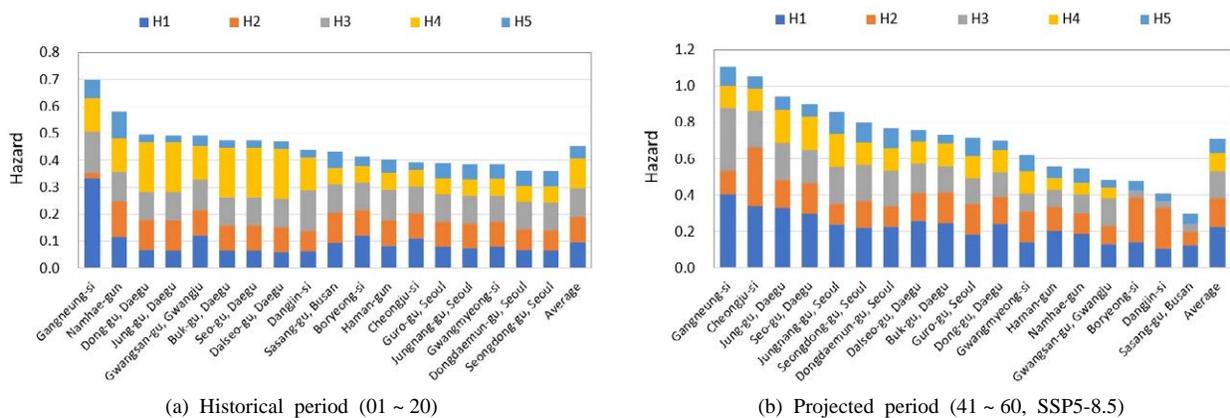


Fig. 12. Results of individual indicator analysis of hazards in historical and projected periods

위해성과 노출성이 모두 큰 영향을 미친 지역은 1개, 노출성과 취약성이 원인이 된 지역은 1개 지역인 것으로 나타났다. 한편, 피해성이 큰 영향을 미친 지역은 서울특별시 중랑구, 구로구, 양천구, 강서구, 영등포구, 송파구, 부산광역시 사상구, 대구광역시 동구, 달서구, 울산광역시 남구, 광명시, 청주시, 익산시, 함안군, 고양시, 포항시, 밀양시, 창원시이다. 노출성이 원인이 되었던 지역은 서울특별시 중랑구, 마포구, 동대문구, 부산광역시 동래구, 강서구, 대구광역시 중구, 서구, 북구, 광주광역시 광산구, 부안군, 당진시, 보령시, 구미시, 남해군, 김해시, 군산시이다. 취약성이 높은 지역은 서울특별시 성동구, 부산광역시 연제구, 구미시, 진주시, 창녕군, 강릉시이다.

기준연도(01~20년)에 피해성이 홍수 리스크의 원인이 되는 18개 행정구역(중북 포함)의 표준화된 피해성 개별 지표의 수치를 Fig. 12에 나타내었다. 각 지표 값의 최댓값은 0~1이다. H1은 설계강우량(100년빈도) 대비 연 최대 강우량 비율, H2는 설계강우량(100년빈도) 50% 초과 강우 일 수, H3는 방재성능목표강우량 대비 강우량 비율, H4는 방재성능목표 강우량 초과 강우 일 수, H5는 연 최대 일 강우량을 나타낸다. H1과 H2는 하천 설계 강우량을 초과하는 강도와 빈도, H3와 H4는 도시, 소하천의 방재성능목표 강우량을 초과하는 강도와 빈도이다. H5는 지역별 임곗값이 없는 전반적인 강우 양상을 나타내는 지표이다. 18개 행정구역의 가중치가 적용된 H1~H5의 평균 값은 각각 0.10, 0.09, 0.11, 0.11, 0.05로 산정되었다. 이는 대부분의 지역에서 H3와 H4 지표가 다른 지표 보다 홍수 리스크 증가에 많이 기여했다는 것을 보여준다. H1과 H2의 임곗값은 100년 빈도 상당의 확률강우량이고, H3와 H4의 임곗값은 30년 빈도 상당의 확률강우량이므로 100년 빈도를 초과하는 강우사상이 발생할 빈도와 강도가 30년 빈도 보다 작기 때문에 H1과 H2 지표가 작게 산정되는 것으로 분석되었다. 즉, 하천 범람 보다는 도시, 소하천의 홍수 피해성이 높다고 볼 수 있다.

SSP5-8.5 기후변화 시나리오의 중미래 기간(41~60년)에서 H1~H5의 평균값은 각각 0.22, 0.16, 0.15, 0.10, 0.08로 산정되었다. 국가 및 지방하천의 설계 강우량을 초과하는 강우의 강도와 빈도를 나타내는 H1, H2 지표 값이 기준연도와 달리 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서 전반적으로 높게 산정되었다. 중미래 기간에는 많은 지역에서 국가 및 지방하천 홍수방어 구조물의 설계강우량을 초과하는 강우 사상 발생 빈도와 강도가 증가하는 것으로 전망되어 H1, H2 지표가 높게 산정 된 것으로 분석되었다.

기준연도에는 피해성의 강도와 빈도를 나타내는 H1~H4의 지표 간의 차이가 크지 않았으나, 중미래 기간에는 피해성의 강도를 나타내는 H1과 H3 지표가 빈도를 나타내는 H2와 H4와 비교하여 크게 산정되어 중미래 기간에 강우량의 극치값이 크게 높아진 것을 알 수 있다.

기준연도(01~20년)의 노출성이 홍수 리스크의 원인이 되는 17개 행정구역(중북 포함)의 표준화된 노출성 지표의 크기를 Fig. 13에 나타내었다. E1은 홍수 위험지역에 위치한 건축물 건축 면적, E2는 농업지역 면적, E3는 도로 면적, E4는 인구이다. 노출성이 높다는 것은 홍수위험 지역인 저지대에 건축물, 농업지역, 도로가 집중되어 있고 인구가 많이 거주한다는 것을 의미한다. 가중치가 적용된 17개 행정구역의 E1~E4 평균값은 각각 0.19, 0.03, 0.10, 0.14로 산정되었다. 이는 대부분의 지역에서 건축물과 인구가 관련이 있는 E1과 E4 지표가 다른 지표 보다 홍수 리스크 증가에 많이 기여했다는 것을 보여준다. 특히, 김해시, 창원시, 고양시, 부산특별시 강서구 및 사상구에서 홍수 위험 건축물 면적 지표(E1)가 높은 것으로 나타났다. 또한 송파구, 강서구, 영등포구, 양천구, 마포구 등 서울특

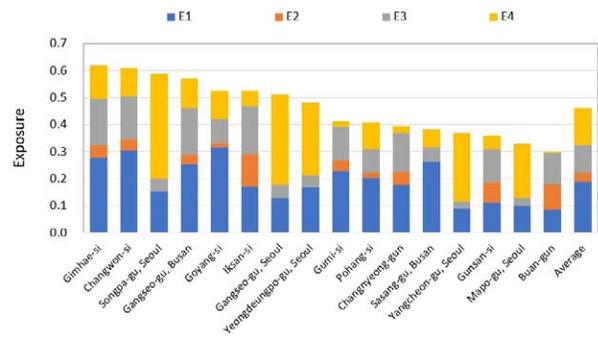


Fig. 13. Results of individual indicator analysis of exposure

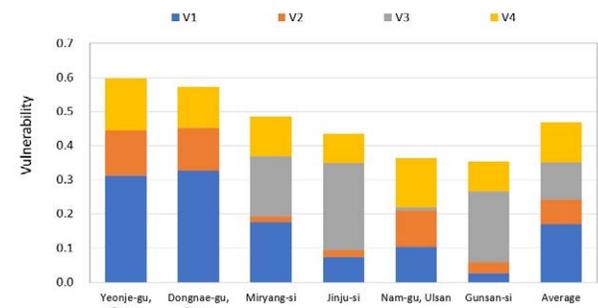


Fig. 14. Results of individual indicator analysis of vulnerability

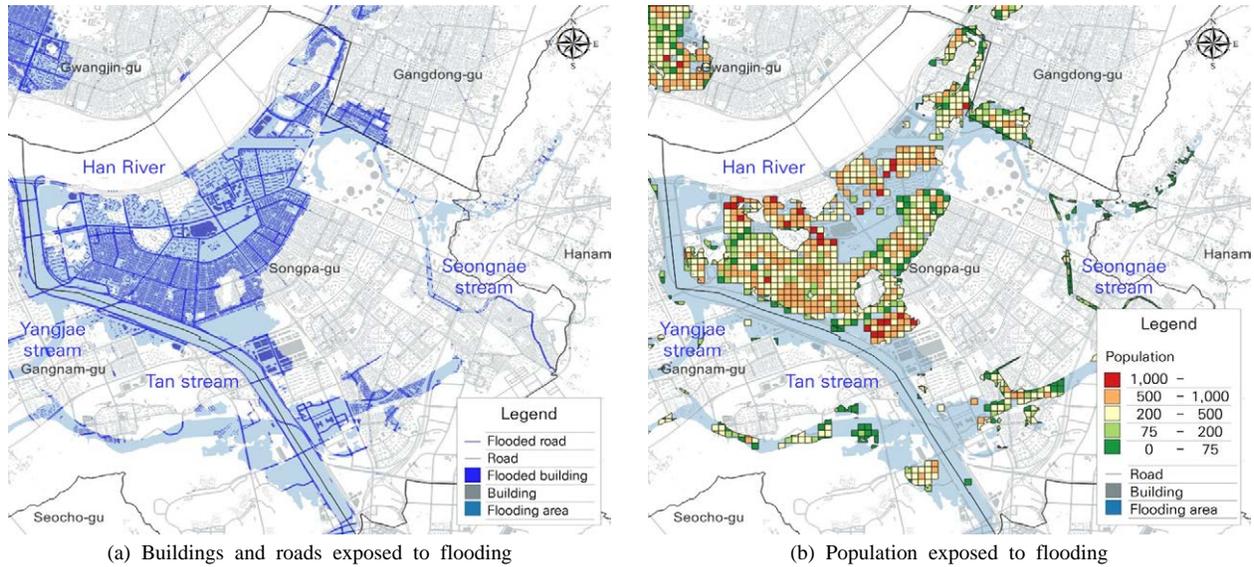


Fig. 15. High-resolution flood risk areas in Songpa-gu, Seoul city

별시 내에 위치한 지역에서 홍수 위험 인구 지표(E4)가 높은 것으로 나타났다. 취약성이 홍수 리스크의 원인이 되는 행정구역은 7개인 것으로 분석 되었고 표준화된 취약성 지표의 수치를 Fig. 14에 나타내었다. 가중치가 적용된 V1 ~ V4의 평균 값은 각각 0.17, 0.07, 0.11, 0.12로 산정되어 과거 침수면적 비율이 리스크 증가에 가장 큰 영향을 미쳤다. 과거 침수면적 비율 지표(V1)가 높은 지역은 부산광역시 연제구, 동래구, 밀양시 지역이고, 불투수면적 비율 지표(V2)가 높은 지역은 부산광역시 연제구, 동래구, 울산광역시 남구인 것으로 나타났다. 하천개수율이 낮은 지역은 밀양시, 진주시, 군산시로 분석되어 하천 홍수 방어를 위한 구조적인 적응대책이 부족한 것으로 나타났다. 마지막으로 노후 하수관로 비율은 7개 지자체가 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

4.3. 고해상도 홍수 리스크 공간정보 활용 방안

노출성이 높은 행정구역 중 도시지역인 서울특별시 송파구와 농업이 발달한 지역인 익산시를 선정하여 고해상도 홍수 리스크 공간정보 활용방안에 대해 서술하였다. 홍수 위험지역에 위치한 건축물과 도로는 폴리곤 형태, 농업지역은 30 m 이하, 인구는 100 m 격자 단위로 표출하였다. 홍수 위험지역에 위치한 건축물 건축 면적과 인구가 높은 서울특별시 송파구의 고해상도 홍수 리스크 공간정보를 Fig. 15와 같이 나타내었다. 이 지역은 양재천이 탄천과 합류하고, 다시 한강과 합류하는 지역이다. 폭우

발생 시 한강의 수위상승으로 양재천과 탄천의 유출량이 원활하게 배수되지 못하여 인근 도시지역의 홍수 발생 가능성이 높을 것으로 판단 된다. 특히 한강과 탄천의 합류 지점에 홍수 위험지역이 넓게 분포되어 있고 건축물과 인구가 집중되어 있어 송파구 내에서도 홍수에 취약할 것으로 예상되는 지역이다. 송파구 전체 인구 약 651,000명 중 262,000명인 40%가 직·간접적으로 홍수에 위험한 지역에 거주하는 것으로 분석되었고, 도로 면적은 218 ha로 행정구역 면적인 33.9 km² 대비 6.4%, 건축 면적은 215 ha로 6.3%, 농업지역은 22 ha로 0.6%인 것으로 나타났다. 송파구는 도시지역으로 대규모 구조적 대책보다 하천 예·경보 시스템 구축, 불투수율 저감, 내수배제를 위한 하수관거 유지 보수, 지하 주택 거주 인명피해 저감을 위한 대책이 주요할 것으로 판단된다.

홍수위험 농업지역의 비율이 높은 전라북도 익산시의 고해상도 노출성 분석 결과를 Fig. 16에 나타내었다. 익산시 북부 지역에 위치한 금강 좌안과 남부지역의 만경강 우안 지역에 Fig. 16(a)와 같이 홍수 위험지역이 넓게 분포되었다. 홍수 노출 대상은 Fig. 16(b)와 같이 대부분 농업지역인 것으로 나타났고 그 면적은 15,412 ha에 달한다. 특히 북부지역의 경우 홍수위험 건축물, 인구, 도로 등의 면적이 작고 Fig. 16(c)와 같이 농업지역의 면적이 매우 높은 것으로 나타났다. 남부 일부 지역은 도시화 된 지역으로 홍수에 노출된 농업지역 면적이 높을 뿐만 아니라 인구, 건축물, 도로 밀도도 높은 것으로 분석되었다. 익산

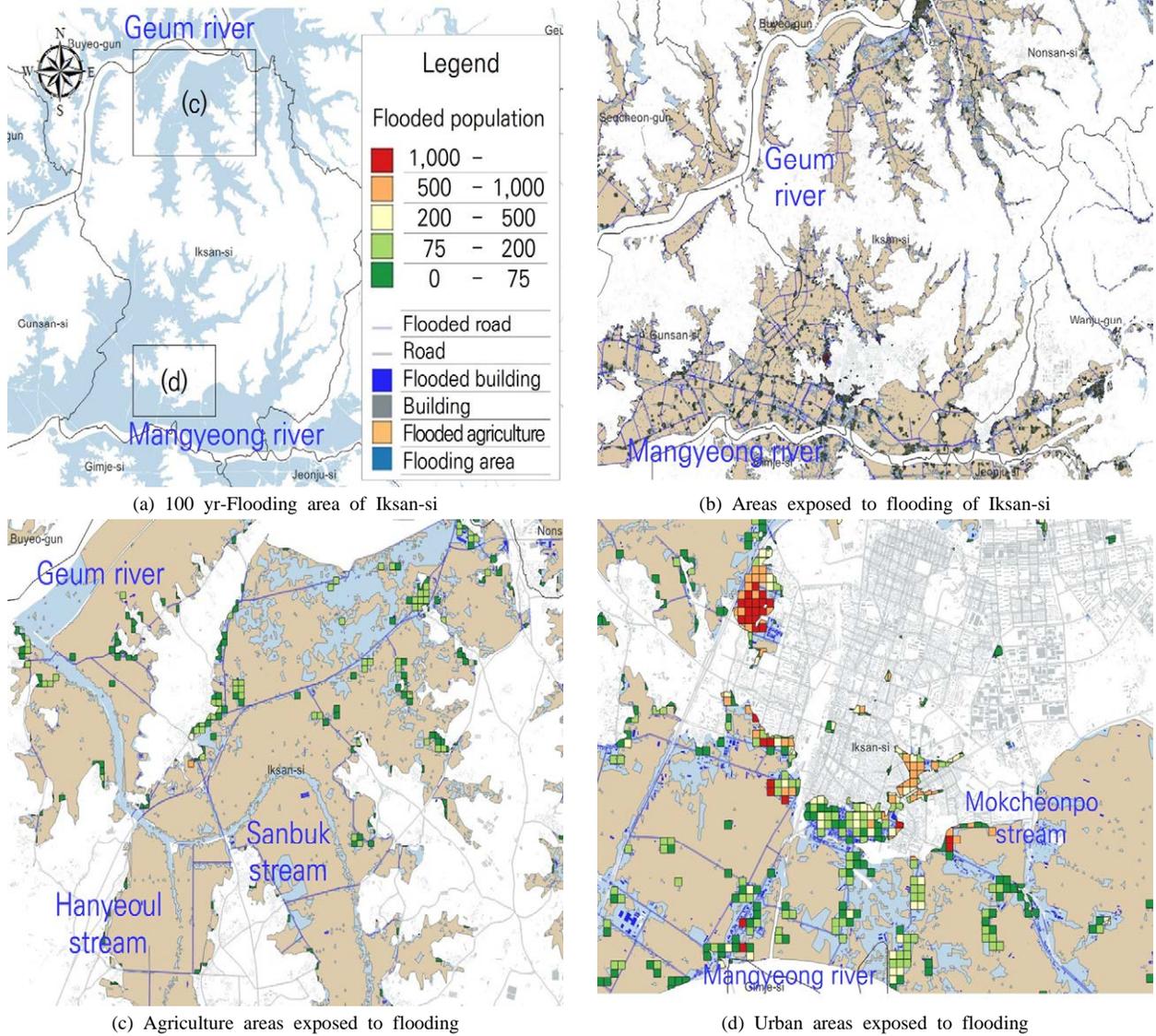


Fig. 16. High-resolution flood risk areas in Iksan-si, Jeollabuk-do

시는 전체 인구 약 267,000명 중 37,000명인 14%가 직·간접적으로 홍수에 위험한 지역에 거주하는 것으로 분석되었고, 도로면적은 789 ha로 행정구역 면적인 506 km² 대비 1.6%, 건축 면적은 241 ha로 0.5%, 농업지역은 15,412 ha로 30.5%인 것으로 나타났다. 익산시는 도시침수 보다 급강과 만경강 본류를 포함한 그 지류들의 홍수 범람에 의한 홍수 피해 발생 위험이 높을 것으로 판단된다. 하천 제방을 축조하여 하천 개수율을 높이고 노후 제방 중심의 구조적 안정성 점검 등 유지관리도 필요할 것으로 판단된다. 또한, 홍수 위험지역 내 공간을 활용하여 저류지 조성도 가능할 것으로 판단되며 폭우 발생시 하천 인근 친수

공간의 이용을 제한하는 등 홍수 예·경보 체계 구축을 통해 인명피해 저감을 위한 대책도 중요하다.

5. 결론

본 연구에서는 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 제5-6차 평가 보고서에서 정의한 기후변화 리스크 개념을 적용하여 기후변화로 인한 홍수 리스크를 평가하였다. 하천과 도시지역의 홍수위험 임계 강우량을 설정하고, 기상청 HadGEM3-RA 모델에 의한 SSP1-2.6과 5-8.5 기반의 기후변화 시나리오를 활용하여 임계값의 초과 강도와 빈

도를 산정 한 후 위해성 지표를 산정하였다. 환경부에서 구축한 전국 홍수 위험지도와 건축물, 도로, 농업, 인구의 고해상도 공간정보를 활용하여 홍수에 노출된 피해대상의 정량적인 규모를 산정하고 노출성 지표로 산정하였으며 과거 홍수지역, 불투수면 등의 민감도 공간정보와 하천개수율과 같은 적응능력 통계자료를 활용하여 취약성 지표를 산정하였다.

홍수 리스크 평가 결과, 고탄소 시나리오에서 미래로 갈수록 홍수위험 등급이 높은 행정구역 수가 증가했으나 저탄소 시나리오에서는 감소하여 탄소중립 이행을 통한 저탄소 시나리오로의 전환의 중요성을 확인하였다. 기준 연도(2001 ~ 2020년)에서 홍수위험이 높은 등급으로 분류된 행정구역 수는 229개 중 14개로 약 6% 수준이었다. 그러나 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서 홍수 위험이 높은 등급으로 분류되는 행정구역 수는 2021 ~ 2040년에 76개(33%), 2041 ~ 2060년에는 96개(42%)로 증가하는 것으로 나타났다. 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)에서는 고위험에 속하는 행정구역 수가 2021 ~ 2040년에 60개(26%)였으나, 2041 ~ 2060년에 31개(14%)로 감소하였다. 기후변화로 인해 미래 홍수 리스크가 증가하는 요인을 지역별로 살펴보면, 서울을 비롯한 일부 수도권과 전라남도 일대, 경상남·북도 동부지역은 500 mm 이상의 극한 강우량의 발생이 주된 요인인 것으로 분석됐다. 중부지역은 미래 일 최대 강우량이 200 ~ 500 mm, 시간 최대 강우량이 100 ~ 160 mm/hr로 상대적으로 매우 높지는 않지만, 하천 설계 강우량이 200 ~ 230 mm, 도시 방재성능목표강우량이 60 ~ 80 mm/hr로 임곱값이 낮아 홍수 리스크가 증가하는 것으로 분석되었다.

지역별 홍수위험 분석결과와 세부 부문별 분석 결과를 살펴보면 총 229개 기초지자체 중 38개가 홍수 위험이 높은 지역으로 분석되었다. 이 중 17개 지역은 위해성, 14개 지역은 노출성, 5개 지역은 취약성, 위해성과 노출성이 모두 큰 영향을 미친 지역은 1개, 노출성과 취약성이 원인이 된 지역은 1개 지역인 것으로 나타났다. 위해성이 높은 18개 지역의 개별지표 분석 결과 하천 범람 보다는 도시, 소하천의 홍수 위해성이 높은 것으로 분석되었고 노출성이 높은 17개 지역은 건축물과 인구, 취약성이 높은 7개 지역은 상습침수 지역을 나타내는 ‘과거 침수면적 비율’이 홍수 위험 증가에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

본 연구 결과는 향후 기후위기 적응 및 재해위험 감소를 위해 재정적 지원이 필요한 지방 정부의 우선순위 결정과 미래 기후변화 양상을 반영한 하천설계 강우량, 방

재성능 목표 강우량 개선에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 적응대책 사업, 시설 설치를 위한 위험지역 선정 및 지표 분석을 통한 적정 대책 선정을 위한 의사결정에 활용할 수 있을 것이다. 다만, 본 연구의 결과는 미래 홍수 리스크 전망시 기상청 HadGEM3-RA 모델에 의한 남한상세 기후변화 시나리오만을 활용하여 불확실성을 내포하고 있으므로 향후 다양한 기후모델에 의한 앙상블 기후자료 활용을 통해 불확실성을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

사사

본 논문은 한국환경연구원에서 환경부의 수탁과제로 수행된 「취약성 평가 도구 지표 및 기능 개선(2024-001-07)」의 연구결과를 기초로 작성되었습니다. 원활한 과제 수행을 위해 SSP 기후변화 시나리오를 제공한 기상청과 홍수 위험지도를 제공한 환경부에 감사드립니다.

Reference

- Allafta H, Opp C. 2021. GIS-based multi-criteria analysis for flood prone areas mapping in the trans-boundary Shatt Al-Arab basin, Iraq-Iran. *Geomat Nat Haz Risk* 12(1): 2087-2116. doi: 10.1080/19475705.2021.1955755
- Bigi V, Comino E, Fontana M, Pezzoli A, Rosso M. 2021. Flood vulnerability analysis in urban context: A socioeconomic sub-indicators overview. *Climate* 9(1): 12. doi: 10.3390/cli9010012
- Bollin C, Cardenas C, Hahn H, Vatsa KS. 2003. Natural disaster network: Disaster risk management by communities and local governments. Washington, DC: Inter-American Development Bank. doi: 10.18235/0008775
- Chen J, Ji J, Wang H, Deng M, Yu C. 2020. Risk assessment of urban rainstorm disaster based on multi-layer weighted principal component analysis: A case study of Nanjing, China. *Int J Environ Res Public Health* 17(15): 5523. doi: 10.3390/ijerph17155523
- Dabanli I. 2018. Drought risk assessment by using drought hazard and vulnerability indexes. *Nat Hazards Earth*

- Syst Sci Discuss. doi: 10.5194/nhess-2018-129
- Davidson R. 1997. An urban earthquake disaster risk index. Stanford, CA: The John A. Blume Earthquake Engineering Center. Report No. 121. doi: 10.25740/zy159jm6182
- De Groeve T, Poljansek K, Vernaccini L. 2014a. Index for Risk Management - InfoRM: Concept and methodology, Version 2014. Luxembourg: Publications Office of the European Union. EUR 26528 EN. doi: 10.2788/78658
- De Groeve T, Poljansek K, Vernaccini L. 2014b. Index for Risk Management - InfoRM: Concept and methodology, Version 2015. Luxembourg: Publications Office of the European Union. EUR 26894 EN. doi: 10.2788/18921
- De Groeve T, Poljansek K, Vernaccini L. 2015. Index for Risk Management - InfoRM: Concept and methodology, Version 2016. Luxembourg: Publications Office of the European Union. EUR 27521 EN. doi: 10.2788/636388
- Ferrazzi M, Kalantzis F, Zwart S. 2021. Assessing climate change risks at the country level: The EIB scoring model. Luxembourg: European Investment Bank. Economics - Working Papers 2021/03. doi: 10.2867/854649
- GIZ (German Agency for International Cooperation), Eurac Research. 2017. Risk supplement to the vulnerability sourcebook guidance on how to apply the vulnerability sourcebook's approach with the new IPCC AR5 concept of climate risk. Bonn, Germany: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.
- Gregor-Gaona MFM, Anglés-Hernández M, Guibrunet L, Zambrano-González L. 2021. Assessing climate change risk: An index proposal for Mexico City. *Int J Disaster Risk Reduct* 65: 102549. doi: 10.1016/j.ijdr.2021.102549
- Hu K, Yang X, Zhong J, Fei F, Qi J. 2017. Spatially explicit mapping of heat health risk utilizing environmental and socioeconomic data. *Environ Sci Technol* 51(3): 1498-1507. doi: 10.1021/acs.est.6b04355
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK; New York, NY: Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2022. Summary for policymakers. In: Pörtner HO, Roberts DC, Tignor M, Poloczanska ES, Mintenbeck K, Alegría A, Craig M, Langsdorf S, Lösschke S, Möller V et al. (eds). Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK; New York, NY: Cambridge University Press. p. 3-33. doi: 10.1017/9781009325844.001
- Kappes M, Keiler M, von Elverfeldt K, Glade T. 2012. Challenges of analyzing multi-hazard risk: A review. *Nat Hazards* 64(2): 1925-1958. doi: 10.1007/s11069-012-0294-2
- Kappes MS, Papathoma-Köhle M, Keiler M. 2012. Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Appl Geogr* 32(2): 577-590. doi: 10.1016/j.apgeog.2011.07.002
- Marin-Ferrer M, Vernaccini L, Poljansek K. 2017. Index for risk management - INFORM: Concept and methodology, Version 2017. Luxembourg: Publications Office of the European Union. EUR 28655 EN. doi: 10.2760/094023
- Mazzorana B, Simoni S, Scherer C, Gems B, Fuchs S, Keiler M. 2014. A physical approach on flood risk vulnerability of buildings. *Hydrol Earth Syst Sci* 18(9): 3817-3836. doi: 10.5194/hess-18-3817-2014
- MOIS (Ministry of the Interior and Safety). 2020. 2019 statistical yearbook of natural disaster.
- Nasiri H, Yusof MJM, Ali TAM, Hussein MKB. 2019. District flood vulnerability index: Urban decision-making tool. *Int J Environ Sci Technol* 16(5):

- 2249-2258. doi: 10.1007/s13762-018-1797-5
- OECD (Organization for Economic Cooperation and Development), EC (European Commission). 2008. Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide. Paris, France: OECD.
- Quesada-Román A. 2021. Landslide risk index map at the municipal scale for Costa Rica. *Int J Disaster Risk Reduct* 56: 102144. doi: 10.1016/j.ijdrr.2021.102144
- Quesada-Román A. 2022. Flood risk index development at the municipal level in Costa Rica: A methodological framework. *Environ Sci Policy* 133: 98-106. doi: 10.1016/j.envsci.2022.03.012
- Rubio CJ, Yu IS, Kim HY, Jeong SM. 2020. Index-based flood risk assessment for Metro Manila. *Water Supply* 20(3): 851-589. doi: 10.2166/ws.2020.010
- Santos PP, Pereira S, Zêzere JL, Tavares AO, Reis E, Garcia RA, Oliveira SC. 2020. A comprehensive approach to understanding flood risk drivers at the municipal level. *J Environ Manag* 260: 110127. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110127
- Sharma SVS, Sarathi RP, Chakravarthi V, Rao GS. 2018. Flood risk assessment using multi-criteria analysis: A case study from Kopili River Basin, Assam, India. *Geomat Nat Haz Risk* 9(1): 79-93. doi: 10.1080/19475705.2017.1408705
- Sun L, Tian Z, Zou H, Shao L, Sun L, Dong G, Fan D, Huang X, Frost L, James LF. 2019. An index-based assessment of perceived climate risk and vulnerability for the urban cluster in the Yangtze River delta region of China. *Sustainability* 11(7): 2099. doi: 10.3390/su11072099
- Uhe PF, Mitchell DM, Bates PD, Sampson CC, Smith AM, Islam AS. 2019. Enhanced flood risk with 1.5 °C global warming in the Ganges-Brahmaputra-Meghna basin. *Environ Res Lett* 14: 074031. doi: 10.1088/1748-9326/ab10ee
- Usman Kaoje I, Abdul Rahman MZ, Idris NH, Razak KA, Wan Mohd Rani WNM, Tam TH, Mohd Salleh MR. 2021. Physical flood vulnerability assessment using geospatial indicator-based approach and participatory analytical hierarchy process: A case study in Kota Bharu, Malaysia. *Water* 13(13): 1786. doi: 10.3390/w13131786
- WMO (World Meteorological Organization). 2021. The atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970-2019).
- Yu I. 2017. Development of an index-based risk assessment model: Focused on flood, wind, and snow disaster [dissertation]. Kongju National University.
- Zhang D, Shi X, Xu H, Jing Q, Pan X, Liu T, Wang H, Hou H. 2020. A GIS-based spatial multi-index model for flood risk assessment in the Yangtze River Basin, China. *Environ Impact Assess Rev* 83: 106397. doi: 10.1016/j.eiar.2020.106397