



## Development of index for flood risk assessment on national scale and future outlook

Kim, Daeho<sup>a</sup> · Kim, Young-Oh<sup>b\*</sup> · Jee, Hee Won<sup>c</sup> · Kang, Tae-Ho<sup>d</sup>

<sup>a</sup>MS student, Department of Civil & Environmental Engineering., Seoul National University, Seoul, Korea

<sup>b</sup>Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

<sup>c</sup>MS student, Department of Civil & Environmental Engineering., Seoul National University, Seoul, Korea

<sup>d</sup>Senior Researcher, Institute of Construction & Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

Paper number: 20-010

Received: 7 February 2020; Revised: 13 March 2020; Accepted: 13 March 2020

### Abstract

Owing to climate change, the annual precipitation in Korea has increased since the 20th century, and it is projected to continue increasing in the future. This trend of increasing precipitation will raise the possibility of floods; hence, it is necessary to establish national adaptation plans for floods, based on a reasonable flood risk assessment. Therefore, this study focuses on developing a framework that can assess the flood risk across the country, as well as computing the flood risk index (FRI). The framework, which is based on IPCC AR5, is established as a combination of three indicators: hazard, exposure, and capacity. A data-based approach was used, and the weights of each component were assigned to improve the validity of the FRI. A Spearman correlation analysis between the FRI and flood damage verified that the index was capable of assessing potential flood damage. When predicting scenarios for future assessment using the HadGEM3-RA based on RCP 4.5 and 8.5, the flood risk tends to be lower in the early and mid-21st century, and it becomes higher at the end of the 21st century as compared with the present.

**Keywords:** Climate change, Flood risk, Adaptation plan

## 전국 단위 홍수위험도 평가를 위한 지수 개발과 미래 전망

김대호<sup>a</sup> · 김영오<sup>b\*</sup> · 지희원<sup>c</sup> · 강태호<sup>d</sup>

<sup>a</sup>서울대학교 건설환경공학부 석사과정, <sup>b</sup>서울대학교 건설환경공학부 교수, <sup>c</sup>서울대학교 건설환경공학부 석사과정,

<sup>d</sup>서울대학교 건설환경종합연구소 선임연구원

### 요지

기후변화로 인하여 한국의 연 강수량은 20세기부터 증가해 왔으며 미래에도 계속 증가할 것이라 전망되고 있다. 이와 함께 홍수 발생 가능성이 동반 상승하고 있기에 합리적인 홍수위험도 평가에 기반한 국가 단위 적응정책 수립이 필요하다. 이에 본 연구는 전국의 홍수위험도를 일괄적으로 평가할 수 있는 체계를 정의하고 홍수위험지수(Flood Risk Index, FRI)를 산정했다. IPCC AR5의 개념을 참고하여 위험도를 위해, 노출, 대응능력의 조합으로 평가하는 체계를 확립하였다. FRI는 자료 기반으로 산출되었으며, 요소별 가중치를 부여하여 설명력 향상을 도모하였다. FRI와 피해자료 간 스피어만(Spearman) 상관성 분석을 한 결과 적절한 수준으로 잠재적인 홍수피해 크기를 평가할 수 있다는 것이 검증되었다. 미래 홍수위험도 평가를 위해 HadGEM3-RA 기반의 RCP 4.5, 8.5 시나리오를 투영했을 때 21세기 초, 중반에는 약화되었다가 21세기 말엔 현재보다 높은 위험도를 보이는 경향이 있었다.

**핵심용어:** 기후변화, 홍수위험도, 적응정책

\*Corresponding Author. Tel: +82--2-880-8916

E-mail: yokim05@snu.ac.kr (Y.-O. Kim)

## 1. 서론

한국 기후변화 평가보고서 2014(ME, 2014)에 따르면 미래 대한민국의 기온과 연위해 지표량은 계속 상승하게 될 것이며 이로 인하여 다양한 재해가 예상되는 바이다. 지난 10년간 우리나라에서 발생한 자연재해 피해액의 약 50%를 차지하는 홍수(MOIS, 2017)의 경우도 예외는 아니어서 2002년 강릉에서 하루 870.5 mm, 2016년 제주도에서 시간당 116.7 mm의 비가 내려 홍수피해가 발생하는 등 기록적 홍수가 빈번히 갱신되고 있다.

재해를 감소시키기 위한 효과적 대책은 합리적인 위험도 평가를 기반으로 수립되어야 하기에 이에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다. 2000년도 초반까지는 OECD (1993)가 제시한 PSR (Pressure-State-Response) 개념을 바탕으로 취약성 (vulnerability) 평가가 주로 이루어져 왔는데, 이는 PSR의 개념이 명확해 재해 원인, 결과, 그리고 대응까지 표현할 수 있었기 때문이다(Turner *et al.*, 2003; Brooks, 2003; Birkmann, 2007; 2011; Sorg *et al.*, 2018). 최근 IPCC (2014)는 재해로 인한 피해의 크기를 직접적으로 추정하고자 위험도(risk)라는 개념을 AR5(Fifth Assessment Report)에서 제시했다. 이 위험도는 위해(hazard), 노출(exposure), 취약성 세 가지 지표의 조합으로 정의되었는데, 이 중 위해는 재해를 일으킬 기상·기후 및 자연적인 요인, 노출은 재해로부터 피해를 받을 요소, 그리고 취약성은 사회 구조적 측면에서의 민감성과 대응 능력 등을 의미하며 자료기반 접근법을 통해 평가된다(IPCC, 2014). 이러한 IPCC AR5에 제시된 개념을 기반으로 위험도를 평가한 대표적 연구에는 World Risk Index (Welle and Birkmann, 2015)가 있는데, 전 지구라는 범위에 적합하도록 인자를 선정하고 IPCC AR5에서 제시한 체계에 합당하도록 인자를 구분하여 지수를 계산한 후 민감도 분석과 불확실성 분석을 통한 타당성 검토를 완료했다. 하지만, World Risk Index는 기후변화에 관련된 가뭄, 홍수, 해수면상승 등 다양한 자연재해를 고려한 연구이기에 홍수와 같이 특정 재해의 위험도만을 파악하는데 한계가 있으며, 국가 단위로 평가된 지수여서 지역적으로 상세한 위험도의 파악이 쉽지 않았다.

즉, 특정 재해가 보다 빈번히 발생하는 소규모 지역에서는 World Risk Index를 직접적으로 적용하기엔 어려움이 있다. 따라서, 홍수피해가 빈번한 지역에서는 홍수에 대한 특정 위험도를 지역적으로 평가하는 연구가 수행되어 왔다. Balica *et al.* (2013)은 IPCC (2007)가 제시한 개념에 기반을 둔 홍수 취약성과 홍수의 침수·범람 수치해석 기반 평가 결과와 하였으며, IPCC 기반 취약성 평가는 사용되는 인자의 선별이 주관

적이라는 한계점에도 불구하고, 사회적 특성을 다양하게 고려할 수 있어서 결과가 대책 마련에 직관적인 도움을 줄 수 있다는 결론을 내렸다. 즉, 수치해석 기반 평가보다 위험도 평가를 실시하는 목적을 더 잘 충족하고 있다는 것이다. 그리스 Rapentoza 지역의 홍수위험도 평가를 위해서 Tsakiris (2007, 2014)는 위해의 크기에 따라 취약성이 변화한다는 관점과 함께 expected annual damage 개념을 적용하였는데, 그 결과가 홍수피해액을 직접적으로 나타낸다는 점에서 차별화되었다. 또한, 사회 기반은 물론 지역 주민의 활동 양식도 고려하여 태국의 홍수위험도를 평가한 연구도 있었는데, 지역적 특성에 따라 적절한 자료의 사용이 매우 중요하다는 결론을 내렸다 (Vojinovic *et al.*, 2016). 이러한 연구들은 IPCC에서 제시한 위험도 체계가 지역적인 홍수위험도 혹은 취약성 평가 시에도 적합하다는 것을 보여줌과 동시에 장점과 주의점도 제시해주고 있는 사례다.

국내에서도 최근 10년간 발생한 재해의 피해액 중 홍수로 인한 피해가 약 50%에 육박할 만큼 많은 지분을 차지하고 있으며, 수자원장기종합계획(MOLIT, 2016)을 2001년부터 4차례 수립하면서 홍수위험도 혹은 취약성을 추정하려는 노력이 지속적으로 이루어져 왔다(Jung *et al.*, 2001; Kim and Kim, 2003; MOLIT, 2006; Lim *et al.*, 2010). 이들 대부분은 IPCC (2007, 2014)가 제시한 개념에 기반을 두었으나, 계산 과정에서 인자 가중치를 동일하게 혹은 설문조사를 통해 부여하는 등 연구자의 주관이 개입되는 방법을 사용하였다. 또한 평가 결과 검증단계에서 사용될 수 있는 피해 자료가 체계적으로 구축되어 있지 않다는 문제점이 존재하였는데, Jang and Kim (2009)은 서울시 내 미세측지역 홍수피해를 지역회귀를 통해 추정하는 연구를 수행하여 피해 자료에 대한 문제를 해결하는 방법론을 제안하기도 했다.

한편, 위험도 평가의 타당성과 정확도를 개선하기 위한 연구들도 활발히 수행되어 왔다. Son *et al.* (2011)은 DPSIR (Driving force-Pressure-State-Impact-Response) 체계를 구축하고 AHP (Analytic Hierarchy Process) 방법으로 가중치를 부여하여 홍수위험도를 평가하였으나 단 6개 중권역에서만 진행되었다. 공간정보시스템(Geographic Information System)의 기술력이 높아짐에 따라 이를 활용해 서울시의 홍수 취약성을 평가한 결과, 취약성과 침수피해 간의 AUC (Area Under the Curve) 정확도가 약 84%라고 보고한 연구도 있었다(Kang and Lee, 2012). Kim *et al.* (2019)은 태풍이라는 특정 홍수 사상에 초점을 맞추어 PSR 체계를 활용해 TRI (Typhoon Risk Index)라는 계산하였는데 이 과정에서 entropy를 사용하여 가중치를 부여했다. Entropy는 자료에서 나타나

는 정보만을 이용하기 때문에 연구자의 주관이 배제될 수 있었지만 TRI는 오직 태풍에 초점을 두었기에 일반적인 홍수위험도를 나타낼 수 없었다. 이렇게 객관적으로 가중치를 부여하는 방법에 대한 연구도 계속 진행되었는데, 베이지안 네트워크를 활용해 충청도의 홍수 취약성을 평가한 사례가 있다 (Joo et al., 2018). 베이지안 네트워크는 AHP, CSS (Constant Sum Scale), entropy를 통해 부여한 세 가지의 다른 가중치 간의 조건부확률 등의 관계를 분석하여 최종적인 가중치를 계산하는 방법으로, 전문가의 주관과 자료의 특성을 융합함으로써 주관적인 방법을 사용한다는 문제점에서 탈피하고자 했다. 이처럼 창의적이고 기술적으로 진보한 홍수위험도 및 취약성 연구 사례가 많으나, 서로 다른 기준 아래 국지적으로 평가가 수행된 것이라 지역 간 일관성이 없어서 지자체 단위로는 활용이 가능하지만 국가 단위의 치수 계획 수립 시에는 활용하는데 어려움이 존재한다. Kim and Kim (2018)은 취약성 평가 이론으로 산정한 FVI와 이미 개발된 PSR, DPSIR을 전국 단위로 산정해 비교분석한 결과, 각 지수는 홍수의 각각 다른 피해 양상을 나타내는 것으로 밝혀졌다. 하지만, 사용된 인자들이 장기적인 기후 시나리오를 반영할 수 없으며, 전국 단위로 산정을 했을 뿐 전국 단위로 평가에 적합하도록 개발된 사례가 아니었다. 과거에 국가 단위로 홍수 취약성을 평가했던 대표적인 사례는 홍수피해잠재능 PFD (Potential Flood Damage)이 있는데, 전국 150개 유역에서 일괄적으로 치수안전도를 평가하였고(Jung et al., 2001) Kim and Kim (2003)은 기존 PFD에 다양한 사회 요소를 포함시키고자 수정 PFD를 산정했으나 내수방어능력에 대한 자료가 부재하던 한계점이 있다고 보고하였다. 또한, Lim et al. (2010)이 PSR 체계를 활용해 전국의 홍수위험지수를 개발하였으나 이는 기후변화를 반영하지 못한다는 한계점이 있었다. 위 사례들은 기후변화 양상이 반영되지 않았으며 현재 참조하기에는 사회·경제적 측면에서의 비현실성이 다소 존재하고 있으므로, 보다 진보된 방법론을 기반으로 전국적인 범위의 홍수위험도를 다시 평가할 필요성이 있다.

이에 본 연구는 국가 단위에서 보다 합리적으로 홍수위험도를 평가할 수 있는 방법론을 제시하고 이를 기반으로 홍수위험도를 평가하고자 한다. 즉, 현재 뿐 아니라 미래도 장기적으로 바라보며 기후변화 적응에 부합할 수 있도록 IPCC AR5에서 제시한 방법론을 기반으로 연구를 수행하고자 한다. 이를 바탕으로 홍수위험지수(Flood Risk Index, FRI)를 산정해 홍수위험도 평가 결과를 수치적으로 나타내었고, 실제 홍수피해자료와 비교하여 설명력을 검증했다. 또한, 기후변화에 의한 영향을 확인하고자 미래 기후 시나리오를 활용했다. 본

연구에서 사용한 방법론은 전국에 일괄적으로 적용하였으며, 따라서 국가 단위의 치수 계획 수립 시 결과를 그대로 활용할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구의 홍수위험도와 그 체계에 대한 정의가 2장에 그에 대한 방법론과 함께 서술되어 있으며, 자세한 방법론 또한 같이 소개되어 있다. 이어 3장에서선 위험도 평가 결과에 대한 검증 을 마친 후 미래 기후변화로 인한 경향성과 지역 간 차이에 대한 분석을 실시하였다. 마지막 4장에서는 본 연구의 결론 그리고 한계점과 추후 방향을 제시하였다.

## 2. 홍수위험도 체계와 지수 산출 과정

본 연구에서는 AR5(IPCC, 2014)를 참고하여 위험도(risk)와 세부 지표(indicator)인 위해(hazard, H), 노출(exposure, E), 대응능력(capacity, C) 대한 정의와 체계를 확립하고 이에 대한 타당성을 FRI (Flood Risk Index)를 통해 검증하고자 한다. 홍수위험도란 예상되는 홍수의 크기로 인해 발생 가능한 잠재적인 피해이며, FRI는 이를 수치화한 것으로 다음 Eq. (1)과 같이 위해, 노출, 대응능력 이렇게 세 가지 지표를 고려한다. AR5(IPCC, 2014)에서는 Fig. 1과 같이 위해, 노출, 취약성 세 지표를 통해 위험도를 나타내고 있지만, 본 연구에서는 IPCC가 제시한 취약성의 여러 요소 중 전산자료로 정량화가 가능한 대응능력을 취약성 대신 사용하였다.

$$FRI = f(H, E, C) = H^{1/3} \times E^{1/3} \div C^{1/3} \quad (1)$$

위해는 시스템에 위험을 일으키는 주요 원인, 즉 트리거와 같은 개념이므로 홍수의 경우는 강수 사상이 고려될 수 있으며, 노출은 인명과 재산과 같이 위해로부터 직접적인 영향을

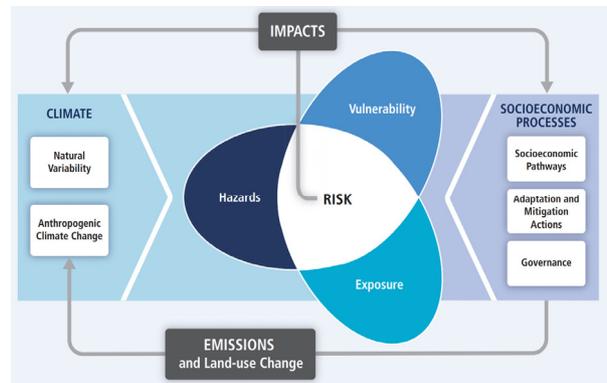


Fig. 1. Risk framework (IPCC, 2014)

받을 요소들로 구성된다. 마지막으로 대응능력은 AR5에서 제시한 취약성의 요소 중 하나인 시스템의 현상유지능력을 일컫는데, 자연환경과 기반시설 그리고 사회·경제 수준에 따라 결정된다. 높은 수준의 위해와 노출은 상대적으로 큰 위험도를, 대응능력은 반대의 관계를 가진다. 이러한 체계는 Fig. 1의 개념도를 통해 간단히 나타낼 수 있다(IPCC, 2014). 위험도 평가를 위한 체계가 다양하게 존재하듯 최종적으로 지수를 산정하는 계산 방법에도 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 본 연구에서 제시하는 홍수위험도 정의와 체계에 가장 잘 부합하는 Tsakiris (2007, 2014)와 Balica (2009, 2013)가 적용했던 것과 비슷한 방법인 Eq. (1)을 적용하였다. Fig. 1의 개념도를 보면 세 지표가 교집합처럼 서로 맞물려 위험도가 된다. 예를 들어 위해가 아무리 커도 그 지역에 피해를 받을 요소가 없어 노출이 0이라면 위험도는 0이 되고, 대응능력이 매우 미흡한 경우엔 위해가 크지 않아도 극심한 위험도가 나타나게 된다. 각 지표에 세제곱근을 한 이유는 기하평균이란 의미를 부여하기 위해서이다. 또한, 본 연구에서는 큰 틀을 정의한 다음 틀 안의 세부 구성요소에 접근하여 문제를 해결하는 하향식 접근법(Top-down approach)으로 Fig. 2에 나와 있는 절차를 거쳐 자료 기반의 홍수위험도를 평가한다. 절차의 첫 단계인 위험도와 세 지표에 대한 체계는 앞서 설명되었으며, 두 번째 단계인 요소(component) 선정에서는 정의에 부합하는 자료를 수집하면서 자료의 신뢰도가 낮거나 확보가 불가능한 요소들을 탈락시키거나 다른 것으로 대체하는 작업을 동시에 실시한다. 그런 다음 전처리 과정을 통해 중권역 단위로 변환

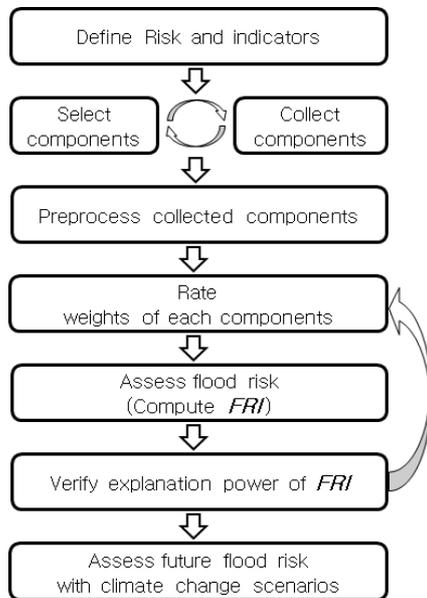


Fig. 2. Flow chart of flood risk assessment

하고 이를 무차원화 시킨다. 각 지표는 속한 요소들의 가중평균으로 계산하고 최종적으로 FRI는 Eq. (1)을 통해 계산한다. 이때, 요소별 가중치 부여 과정은 FRI의 설명력을 검증하면서 수정되는 시행착오를 거치게 된다.

## 2.1 홍수위험지수 산출 과정

### 2.1.1 자료수집과 전처리

본 연구에선 자료 기반 홍수위험도 평가를 진행하므로 객관적이고 신뢰성 있는 자료를 우선적으로 확보하여야 한다(Balica *et al.*, 2013; Tsakiris, 2007; 2014; Vojinovic *et al.*, 2016). 따라서 국가기관에서 검증한 자료를 중심으로 수집해 사용하고자 한다. 노출과 대응능력에 해당하는 자료는 일반적으로 행정구역 단위로 제공되므로 티센가중치법을 활용해 중권역단위 자료로 변환하고, 요소들의 단위가 모두 다르기 때문에 무차원화를 거쳐 요소들을 하나의 함수에서 다룰 수 있도록 가공하는 과정을 거친다. 노출과 대응능력의 각 요소는 Eq. (2)처럼 113개 중권역의 최댓값으로 나누는 rescaling 방법을 사용했다. Eq. (2)에서  $x$ 는 임의의 요소를 표현하며 따옴표(')는 원자료, 아래첨자  $j$ 는 중권역을 의미한다.

$$x_j = x'_j / \max_j(x'_j) \tag{2}$$

위해 요소는 위에서 언급했다시피 강수량이다. 특정 기간의 대푯값은 30년 자료의 평균을 사용했는데, 기후는 일반적으로 30년 동안의 특성으로 알려져 있기 때문이다. 예를 들면 2036년부터 2065년까지의 연 최대 일강수량 기댓값이 그 기간의 대푯값인 것이다. 최종적으로 Eq. (3)처럼 기댓값을 100년 빈도값  $h'_{j,99}$ 으로 나누어 무차원화 한다. Eq. (3)에서  $h$ 는 위해 지표  $H$ 에 속하는 요소를 의미한다. 이와 같은 무차원화를 위해 선 확률밀도함수를 추정하고 빈도분석을 실시해야 한다.

$$h_j = E(h'_j) / h'_{j,99} \tag{3}$$

### 2.1.2 가중치 부여 및 지표 선정

가중치 부여 과정은 홍수위험도 평가 시 요소 선정에 대한 중요성을 강조하거나 연구자 주관의 개입을 방지하기 위해 생략되기도 한다(Balica *et al.*, 2009; 2013). 하지만 가용 자료가 존재하는 경우 설명력을 향상시키기 위해서는 가중치를 부여하는 것에 대한 타당성이 있으며, 가중치를 부여해 신뢰도가 향상된 국내 연구 사례가 존재한다(Joo *et al.*, 2018; Kang and Lee, 2012; Son *et al.*, 2011). 따라서, 본 연구에서는 홍수피해액 자료를 활용하여 요소별 가중치를 부여하고자

**Table 1.** Classification of importance using the pearson correlation coefficient

Pearson correlation coefficient $r$	Importance $w$
$r \leq -0.1$	1
$-0.1 < r \leq 0$	2
$0 < r \leq 0.1$	3
$0.1 < r \leq 0.2$	4
$0.2 < r \leq 0.3$	5
$0.3 < r \leq 0.4$	6
$0.4 < r$	7

하였다. 자연재해에 의한 피해는 시대에 따라 변화해왔는데 사회경제적 요인과 연관이 있기 때문이다. 예를 들어, 과거에는 재해 발생 시 조치사항에 대한 사회적, 구조적 대책이 미흡해 인명피해의 비율이 높았으나, 시간이 지날수록 이러한 점이 해소되어 인명피해는 큰 폭으로 감소하였다. 이와는 반대로 재산피해는 급격한 경제성장과 함께 동반상승한 결과 현재는 인명피해보다 재산피해가 지배적이다(MOIS, 2017).

베이지안 네트워크를 사용해 가중치를 부여하는 등 (Joo et al., 2018) 진보된 가중치 부여 방법이 존재하나, 본 연구는 기후변화 적응을 위한 홍수위험도 평가 체계를 구축하고 절차를 확립하는 것이 주된 목적이므로 비교적 간단하면서도 객관적일 수 있는 홍수피해액과의 상관성분석을 이용한 방법을 고안했다. 우선 각 요소와 홍수피해액과의 Pearson 상관계수  $r$ 를 산출한다. Table 1과 같이 요소와 홍수피해액간 큰 상관성이 있으면 해당 요소의 중요도가 크다고 판단했으며, 이 과정에서 FRI의 설명력 검증 결과를 반영해  $r$ 의 범주와 중요도의 값을 수정하는 시행착오를 거쳤다. 그런 다음엔 Eq. (4.1)와 같이 중요도 가중평균을 실시해 각 지표별을 계산한다. 예를 들어 위해 지표  $H$ 는 Eq. (4.2)와 같이 계산된다. Eqs. (4.1) and (4.2)에서 영어 대문자는 지표, 영어 소문자는 해당 지표에 속하는 요소를 의미한다. 그리고 지표 내 요소를 구분하기 위해 아래첨자  $i$ 를 사용했다.

$$X = \frac{\sum w_{i,X} x_i}{\sum w_{i,X}} \quad \text{where } X = H, E \text{ and } C \quad (4.1)$$

$$H = \frac{\sum w_{i,H} h_i}{\sum w_{i,H}} \quad (4.2)$$

## 2.2 홍수위험지수 산정 및 설명력 검증

홍수위험도 평가를 위해 세가지 지표  $H, E, C$ 를 Eqs. (1)에

대입해 FRI를 계산한다. 지수의 신뢰도는 과거 홍수피해액과의 스피어만(Spearman) 상관계수  $\rho$ 를 통해 검증된다. 비모수적 방법인 스피어만 상관성분석으로 검증한 이유는 위험지수와 피해액이 선형적인 관계에 있지 않기 때문이다. 스피어만 상관계수  $\rho$ 는 두 변수의 서열이 일치할수록 높은 값을 갖게 되므로, 잠재 피해량의 상대적 크기를 수치화한 FRI의 신뢰도 검증을 위해서 사용될 수 있다고 판단했다.

## 3. 적용

### 3.1 개요

본 연구에서 홍수위험도 평가를 위해 선정된 요소는 총 26개이다(Table 2). 위에서 언급했듯이 신뢰성 있는 자료를 확보하기 위해 국가통계포털(KOSIS), 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)과 한국대매회(KNCOLD)에서 공개한 자료를 사용했으며 자료의 기록 시점을 포함한 정보들이 Table 2에 기록되어 있다. 위해 지표의 요소는 WMO (World Meteorological Organization)에서 기후변화로 인한 극한사상 감지를 위해 제시한 ETCDDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) 중 강수 관련 극한지수를 참조하였다. 여러 가지 강수극한지수 중 과거 국내 홍수 피해와의 유의미한 상관성이 존재하는 1일, 3일 최대 강수량(1 day peak, 3 day peak)과 연간 집중호우 일수(Heavy rain days)가 위해지표의 요소로 선정되었다. 과거 기록으로 분석한 결과, 3일 최대 강수량은 장기간에 걸친 비(장마 등)로 인한 하천 범람 및 침수를 잘 표현하고 있으며 1일 최대 강수량과 연 집중호우 일수는 최근 잦아지고 있는 돌발 홍수에 의한 피해를 잘 나타내고 있었다(MOIS, 2017). 따라서 이 세 가지 요소가 국내에서 강수 기후로 인해 발생할 수 있는 홍수 피해(장마, 호우 등)를 잘 표현하는 것으로 판단되어 위해지표의 요소로 사용되었다. 노출 지표는 인구밀도, 재산밀집도 외에도 특히 취약한 인원과 시설 등을 같이 고려하기 위해 노령과 아기 인구, 홍수취약가옥 등의 요소도 포함하였다. 대응능력 중 적응능력은 자연, 기술, 사회적 요소들을 통해 표현하였다. 이에 속한 요소들은 대표적으로 수계빈도, 녹지 면적, 댐 용량과 치수사업투자비 등이 있다. 마지막으로 대응능력 중 조치능력은 단어 그대로 응급상황 발생 시 조치를 위한 가용 장비와 인원을 통해서 평가하고자 했다. 가중치 보정과 검증에 필요한 홍수 피해액자료는 최근 10년인 2007~2016년 간의 기록을 사용했다. 그 이유는 시대에 따라 홍수 피해 양상이 변화하며, 특히 2010년대 초중반에 실시된 4대강 사업으로 인하여 치수능력

Table 2. List of FRI components

Indicator	Division	Component	Char.	Source	Year
Hazard	Climate & Meteorology	1 day peak	$h_1$	KMA	1966-2016
		3 day peak	$h_2$	KMA	1966-2016
		Heavy rain days (80 mm/day)	$h_3$	KMA	1966-2016
Exposure	Life	Population density	$e_1$	KOSIS	2014
		Olds and kids (65 ↑ and 5 ↓)	$e_2$	KOSIS	2017
	Asset	Asset density (Urbanization)	$e_3$	KOSIS	2016
		Houses vulnerable to flood	$e_4$	KOSIS	2015
		Underground shopping center area	$e_5$	KOSIS	2016
		Traditional market area	$e_6$	KOSIS	2016
		Cultural assets	$e_7$	KOSIS	2016
		Production area (paddy, farm, etc.)	$e_8$	KOSIS	2015
Capacity	Adaptive capacity	Channel-Segment Frequency	$c_1$	WAMIS	2011
		Green belt area	$c_2$	KOSIS	2017
		Forest area	$c_3$	KOSIS	2017
		Stream shape factor	$c_4$	WAMIS	2011
		Basin slope	$c_5$	WAMIS	2016
		Precipitation and water level observatory	$c_6$	WAMIS	2009
		Dam storage	$c_7$	KNCOLD	2017
		River improvement rate	$c_8$	KOSIS	2014
		Per capita income	$c_9$	KOSIS	2015
		Financial self-reliance ratio	$c_{10}$	KOSIS	2017
		Investment on flood control	$c_{11}$	WAMIS	2009-2013
	Coping capacity	Sewered population percentage	$c_{12}$	KOSIS	2015
		Rainwater pump capacity	$c_{13}$	WAMIS	2013
		Retarding basin area	$c_{14}$	KOSIS	2017
		Available manpower in emergency (police, firefighter)	$c_{15}$	KOSIS	2017

및 하천 특성에 큰 변화가 생겼기에 현 시점 및 미래의 홍수 위험도 평가를 위한 보정과 검증은 최근 자료를 활용하는 것이 적합하다고 판단하였기 때문이다.

FRI 산정 전 강수량 빈도분석과 무차원화 등의 전처리 후 요소별 가중치를 부여하여 세 지표와 FRI를 산정했으며, 결과 분석 및 검증과 미래 홍수위험도 평가를 수행하였다. 미래 홍수 위험도 평가는 노출과 대응능력, 그리고 각 요소의 중요도는 현재와 같다는 가정 하에, 즉 최근 시점의 홍수위험도에 맞게 보정된 가중치로 미래의 홍수위험도를 평가하였다. 우리나라는 지형 등의 영향으로 기후의 지역적 차이가 큰 편으로써 전지

구 기후변화 시나리오 자료의 상세화가 필요하다. 따라서 이 연구에서는 1 km 격자 단위의 공간해상도를 지닌 지역기후모델 HadGEM3-RA의 RCP 4.5와 8.5 시나리오를 이용하였다. RCP 4.5는 현재 수준의 탄소 배출량이 지속되었을 때, RCP 8.5는 탄소 배출량이 현재보다 매우 증가하였을 때의 기후 시나리오이다. 21세기 초, 중, 말기 변화를 보고자 2030, 2050, 2080년 세 시점을 대표 기간으로 선정해 해당 시점의 ± 15년 강수량인 총 30년간 자료 사용하여 위해 요소별 기댓값을 산출한 다음, 변화 추이를 관찰하고자 현재 시점의 100년 빈도 값으로 나누어 무차원화 하였다. 시나리오 별로 홍수위험도가 공간적으로

어떻게 분포하게 되는지, 시간 흐름에 따라 어떻게 변화하는지 현재와 비교했으며 그 원인을 분석했다.

### 3.2 자료 전처리와 가중치 부여

위해 지표의 요소들을 무차원화 시키기 위해선 확률밀도 함수를 먼저 추정해야 한다.  $h_1$ 과  $h_2$ 의 관측 자료를 여러 분포로 추정한 결과 Gumbel 분포가 전국의  $h_1$ 과  $h_2$ 를 95% 신뢰수준에서 유의하게 추정할 수 있었다. Gumbel 분포는 GEV 분포(Generalized Extreme Value distribution)의 특수한 형태로서 우리나라 강수량 자료에 적합한 것으로 알려져 있으며

(Lee *et al.*, 2000), 특히 연 최대 강수량은 그 변동성이 적어 2변수 확률분포형의 적용성이 높은 편이다.  $h_3$ 는 1년 내 발생 횟수를 측정한 이산변수이기에 Poisson 분포로 추정했으며, 이 또한 전국에서 95% 신뢰수준에서 유의했다. 위해 요소 자료는 Eq. (3)과 같이 무차원화 되었다. 노출과 대응능력 지표의 요소 자료들은 Eq. (2)를 통해 무차원화 되었고, 이를 사용해 지수와 지표를 산정하였다. 행정구역 단위로 수집된 자료는 티센가중치법을 활용해 중권역 단위 자료로 재구성했다.

보정된 중요도와 가중치는 Table 3에 기록되어 있다. 지표 요소들의 중요도가 모두 같으면 가중치는 동일하며, 한 지표

Table 3. Importance and weights of the components

Indicator	Division	Component	Abbr.	Importance	Weight
Hazard	Climate & Metrology	1 day peak	$h_1$	6	0.316
		3 day peak	$h_2$	6	0.316
		Days of heavy rain (80 mm/day)	$h_3$	7	0.368
Exposure	Life	Population density	$e_1$	6	0.136
		Olds and kids (65 ↑ and 5 ↓)	$e_2$	5	0.114
	Asset	Asset density (Urbanization)	$e_3$	7	0.159
		Houses vulnerable to flood	$e_4$	5	0.114
		Underground shopping center area	$e_5$	1	0.023
		Traditional market area	$e_6$	7	0.159
		Cultural assets	$e_7$	7	0.159
		Production area (paddy, farm, etc.)	$e_8$	6	0.136
Capacity	Adaptive capacity	Stream frequency	$c_1$	3	0.050
		Green belt area	$c_2$	6	0.100
		Forest area	$c_3$	5	0.083
		Stream shape factor	$c_4$	1	0.017
		Basin slope	$c_5$	1	0.017
		Precipitation and water level observatory	$c_6$	1	0.017
		Dam storage	$c_7$	2	0.033
		River improvement rate	$c_8$	1	0.017
		Per capita income	$c_9$	7	0.117
		Financial self-reliance ratio	$c_{10}$	7	0.117
		Investment on flood control	$c_{11}$	5	0.083
	Coping capacity	Sewered population percentage	$c_{12}$	7	0.117
		Rainwater pump capacity	$c_{13}$	6	0.100
		Retarding basin capacity	$c_{14}$	3	0.050
		Available manpower in emergency (police, firefighter)	$c_{15}$	5	0.082

내의 가중치 합은 1이다. 위해의 세 요소 중 집중호우 일수의 가중치가 가장 높은 것을 보면 최근 집중호우로 인한 돌발홍수로 인한 피해가 많다는 2017년 재해연보의 기록을 나타내고 있는 것으로 보인다. 노출 지표 요소 중 지하상가를 제외한 모든 요소가 높은 중요도를 갖고 있는 것으로 보아 인구가 밀집된 지역일수록, 재산이 많이 집중된 곳일수록 홍수로 인한 피해액이 커질 것으로 보인다. 대응능력 요소 개수가 타 지표에 비해 많기 때문에 대응능력의 요소의 중요도가 타 지표 요소의 중요도와 같더라도 가중치가 작다. 예를 들어서, 노출 지표의 인구밀도와 대응능력 지표의 우수펌프량의 중요도는 같지만, 가중치는 인구밀도가 더 높다. 총 26개라는 많은 요소를 사용하였기에 홍수와 연관성이 작은 요소가 존재할 수 있고 지수 및 지표 계산 시 과적합(overfitting) 문제가 발생할 수 있는데, 본 연구에서는 오히려 가중치를 부여함으로써 홍수피해와의 연관성이 작은 요소가 제외되도록 유도하였다. 간단한 방법이라 최적화된 가중치를 부여하기 어렵지만 시행착오를 거치면서 신뢰도가 개선되었고, 이를 통해 적절한 가중치 부여가 위험도 평가의 신뢰도를 높일 수 있다는 것을 확인했다. 또한 지역특성과 홍수 원인에 따라 가중치를 다르게 부여할 것도 고려했으나, 과적합 가능성이 농후해 질 것이라 판단해 전국에서 일괄적으로 부여했다. 주성분분석과 같은 기법을 통한 차원축소로 과적합을 방지해볼 수는 있으나, 지배적인 요소가 무엇인지, 어떤 대응능력을 강화해야 효과적인지 등을 알기 힘들어진다. 그리고 중요도가 낮은 요소들은 그들이 전통적으로 갖고 있는 홍수와의 연관성 때문에 간단히 제거할 수 없었다.

### 3.3 지표와 홍수위험지수 산정 결과

위 과정을 거쳐 산정된 113개 중권역의 각 지표를 계산한 결과는 Fig. 3에 나타나 있다. 현재 시점에서 위해 지표  $H$ 의 지역 분포를 통해 알 수 있는 바는 홍수가 발생할 가능성이 전국적으로 비슷한 수준이라는 것이다. 이에 비해 노출 지표  $E$ 는 서울 및 수도권권과 부산 해운대가 매우 높은 상태이다. 그리고 대응능력 지표  $C$ 는 산맥 줄기를 따라서 높게 분포된 경향을 보이는데 이는 산림과 같은 자연적인 요소들의 중요도가 크기 때문으로 사료된다.  $E$ 와 FRI간의 스피어만 상관계수가 0.91로 위해와 대응능력보다 높고, Fig. 4(a)의 FRI 공간 분포와도 매우 유사한 것을 보면 노출 지표가 가장 지배적인 것을 알 수 있다. FRI와 홍수피해(2007~2016년, Fig. 4(b)) 간 스피어만 상관계수를 전국과 5대 권역에서 계산하여 Table 4에 기록하였다. 전국에서 0.53인 것을 보면 FRI로 홍수피해를 적절히 (moderate) 평가할 수 있는 수준이다(Rovai et al., 2013).

모든 유역에서 가중치가 없을 때보다 가중치를 부여했을 때 더 나은 신뢰도를 보이고 있는 것을 보면, 현재의 가중치가 발생 가능한 홍수의 잠재적 피해량을 더 정확히 표현할 수 있음이 검증되었다. 권역별로 나누어 보면 금강, 섬진강, 영산강 유역에서 강한 상관성을, 한강과 낙동강에서는 적절한 상관성을 보이면서 각 유역에서도 보통 이상의 신뢰도를 갖고 있음이 검증되었다. 과거 피해 기록과 가장 큰 불일치를 보이고 있는 남강댐(2018)과 남한강하류(1007) 유역은 연구에 활용된 피해액의 자료 기간 동안(2007~2016년) 특히 태풍으로 인한 피해를 크게 입은 지역이다. 앞서 언급했듯이 FRI는 강수 기후를 통해 추정할 수 있는 홍수를 표현하기에 적합하도록 개발되었으므로, 태풍처럼 강수량만으로 위력이 추정되기

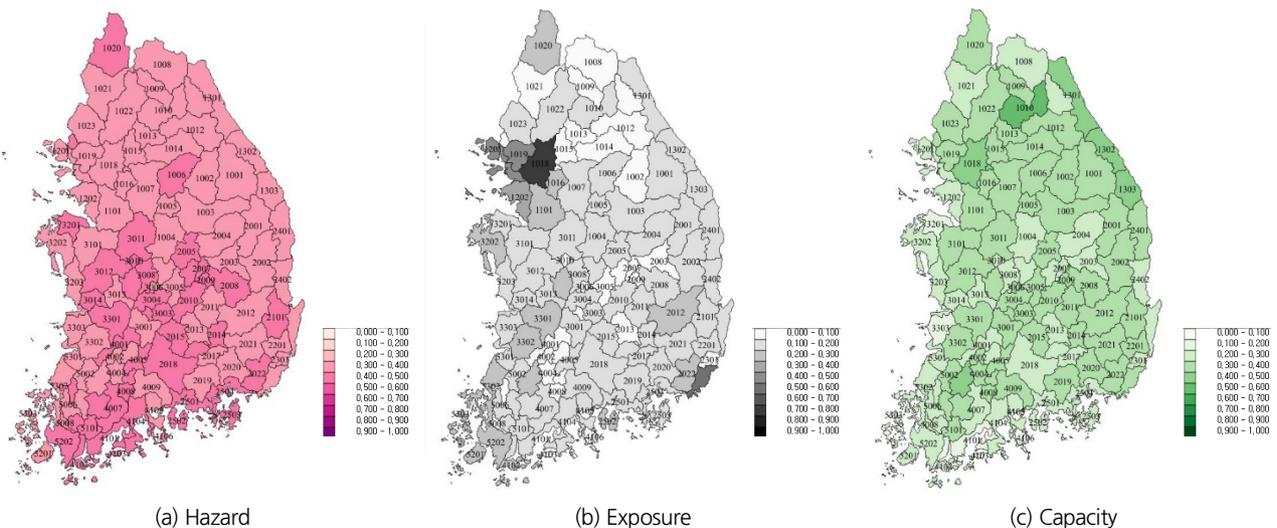


Fig. 3. Spatial distribution of hazard, exposure, and capacity for the present

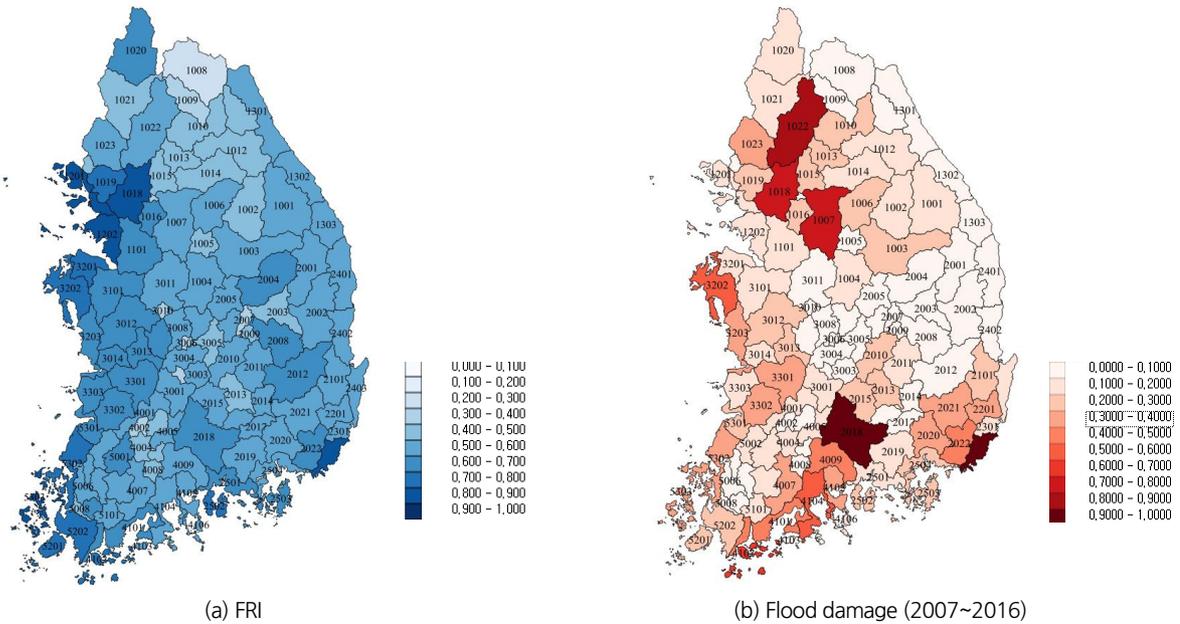


Fig. 4. Comparison between the estimated FRI and observed flood damage (2007~2016)

Table 4. Spearman correlation coefficient

Case	Total	Hangang	Nakdonggang	Geumgang	Sumjingang	Yeongsangang
No weight	0.382	0.278	0.395	0.579	0.900	0.644
With weight	0.526	0.440	0.495	0.784	0.886	0.727

힘들고 우발적으로 특정 지역에 큰 피해를 집중시키는 특성이 있는 홍수 사상은 본 연구에서 사용된 위해지표의 세 요소로는 추정에 한계가 있다.

또한, 많은 시행착오에도 불구하고 FRI의 신뢰도가 더 나아지지 못한 이유는 과거 데이터의 부재 때문인 것으로 사료된다. 가중치 산정을 위해 사용된 홍수피해액 자료는 2007~2016, 총 10년간의 자료지만 노출 및 대응능력 지표의 요소들은 한 시점의 자료들이다. 노출 및 대응능력의 요소들이 홍수 피해에 직접적으로 끼치는 영향을 파악하기 위해선 각 요소별로 시간 변화에 따른 홍수피해액 증감효과를 파악해야한다. 예를 들어, 한 지역의 우수펌프 용량이 증가할 때 홍수피해액이 어떻게 변화하는지 분석하여야 우수펌프 용량이 홍수피해에 미치는 영향을 알 수 있을 것이다. 하지만 본 연구에서는 데이터베이스의 한계로 인해 과거 우수펌프 용량 자료가 부재한 상태라 이에 대한 분석을 실행할 수는 없었고 타 요소도 같은 실정이다. 더불어, 공간상관성을 분석하는 과정을 거쳤기 때문에 위험도 평가가 지역적으로 상대적인 결과라는 점을 탈피하지 못하였다.

### 3.4 미래의 홍수위험도 평가

앞서 언급했듯이 본 연구에서는 1 km 격자 단위 공간해상도를 지닌 지역기후모델 HadGEM3-RA의 RCP 4.5와 8.5 시나리오를 이용하였다. 해당 기후 시나리오는 기상청으로부터 제공받았으며, 이를 본 연구에서 사용하기 위해서 중권역별 평균값을 계산했다. HadGEM3-RA는 재현기간 동안 한반도 강수량의 관측 평균 및 연간 변화를 효과적으로 포착하는 것으로 보고되었지만(Huang *et al.*, 2015; Oh *et al.*, 2016), 다른 국가 기후변화 표준 지역 기후 모델 시나리오(RegCM4, SNURCM, GRIMS, WRF)와 비교해보면 최대 강수량을 다소 건조하게 전망하고 있는 것으로 확인되었다(Kim *et al.*, 2015). 2030, 2050 그리고 2080년대를 중심으로 평가한 전국 홍수위험도는 Figs. 5 and 6에 나타나 있으며, 현재를 포함한 각 기간별 홍수위험도 상위 3개 및 하위 3개 지역은 Tables 5 and 6에, 각 기간의 평균, 최소, 최대 위험도는 Tables 7 and 8에 기록되어있다. 미래 전국의 홍수위험도가 공간적으로 어떻게 분포되고 시간이 갈수록 어떻게 변화하는지 분석하였고, 타 기후변화 연구들의 결과와 비교 분석을 통해 본 연구의 홍수위험도 평가 결과를 정성적으로 고찰하였다.

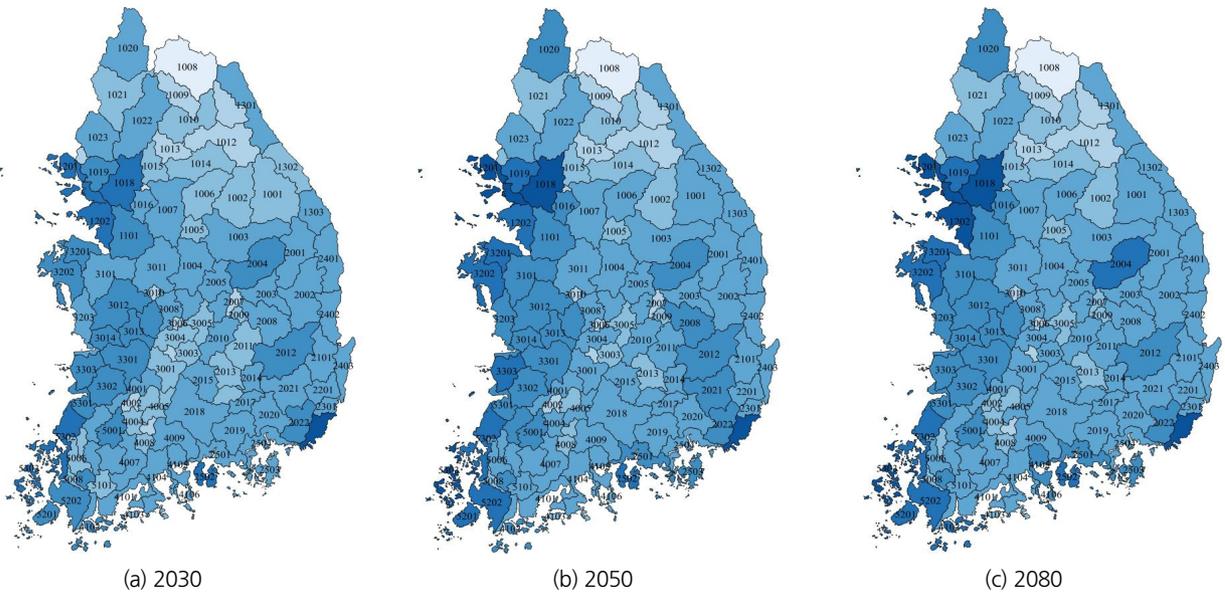


Fig. 5. Future FRI predicted using HadGEM3-RA for RCP 4.5

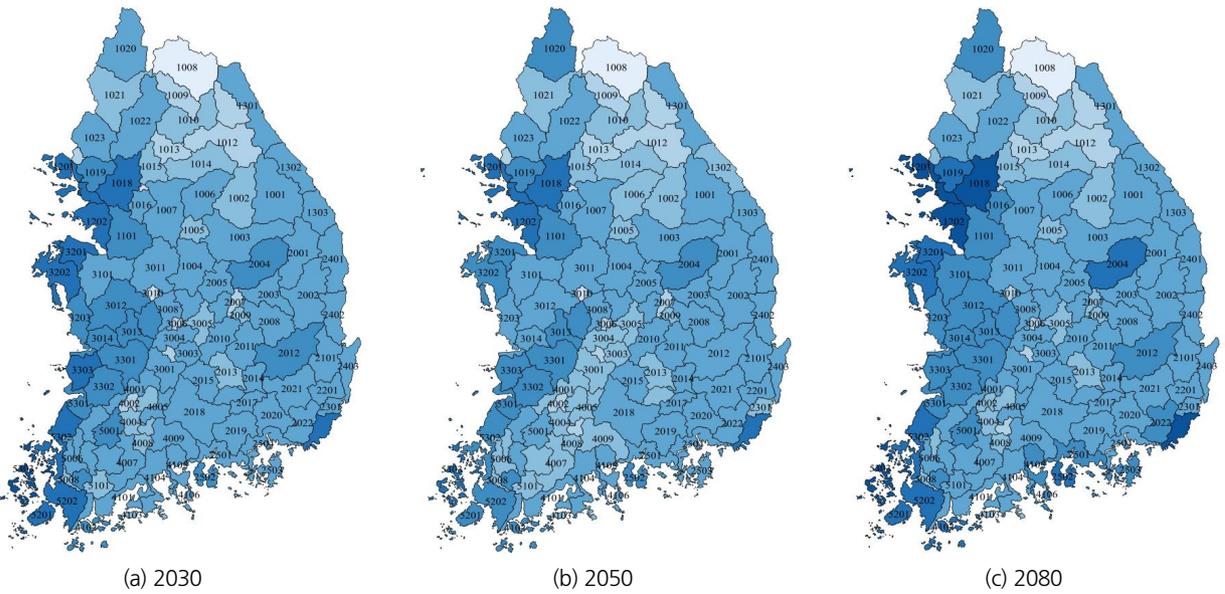


Fig. 6. Future FRI predicted using HadGEM3-RA for RCP 8.5

3.4.1 미래 홍수위험도의 공간 분포

현재 시점과 마찬가지로 노출이 높은 도시인 부산의 수영장과 서울 등지의 지역의 홍수위험도가 대체적으로 큰 반면 금강산담과 같이 노출이 매우 작은 지역은 위험도가 항상 가장 낮다. 한편, 두 시나리오에서 모두 미래로 갈수록 최대값은 커지고 최소값은 작아졌다. 이는 근소하지만 지역간 홍수위험도의 격차가 커졌다는 것인데, 이는 투명한 전지구모델의 기후 시나리오에서 지역 간 강수량 불균형이 발생하기 때문이

다. Ghafouri-Azar and Bae (2018)은 기상청의 CMIP5 기후 모델의 시나리오들의 미래 강수량 및 유량을 분석하여 강수량의 지역별 분배의 불균등이 심화됨에 따라 홍수량에도 지역간 차이가 있는 것을 밝혀내었다(Ghafouri-Azar and Bae, 2018). 이처럼 HadGEM3-RA를 포함하여 기상청에서 생산하는 기후 시나리오에서 확인되는 강수의 지역 불균형을 본 연구에서 산정한 FRI에서도 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 전반적으로 도시 지역의 홍수위험도는 미래로 갈수록 상

**Table 5.** Highest and lowest FRI basins predicted using HadGEM3-RA for RCP 4.5

Case	Rank	Present	2030	2050	2080
Highest	1	Seoul	Suyeonggang	Suyeonggangr	Seoul
	2	West coast of Hangang	Sinan-gun	Seoul	Suyeonggang
	3	Suyeonggang	Seoul	West coast of Hangang	West coast of Hangang
Lowest	1	Mt. Geumgang dam	Mt. Geumgang dam	Mt. Geumgang dam	Mt. Geumgang dam
	2	Paldang dam	Paldang dam	Paldang dam	Paldang dam
	3	Downstream of Daecheong dam			

**Table 6.** Highest and lowest FRI basins predicted using HadGEM3-RA for RCP 8.5

Case	Rank	Present	2030	2050	2080
Highest	1	Seoul	Sinan-gun	Suyeong river	Seoul
	2	West coast of Han river	Seoul	Seoul	Suyeong river
	3	Suyeong river	West coast of Han river	Sinan-gun	West coast of Han river
Lowest	1	Mt. Geumgang dam	Mt. Geumgang dam	Mt. Geumgang dam	Mt. Geumgang dam
	2	Paldang dam	Paldang dam	Paldang dam	Paldang dam
	3	Downstream of Daecheong dam			

**Table 7.** FRI statistics predicted using HadGEM3-RA for RCP 4.5

Case	Present	2030	2050	2080
Mean	0.5623	0.5308	0.5614	0.5664
Max	0.2018	0.1791	0.1906	0.1895
Min	0.8538	0.8352	0.8737	0.8635

**Table 8.** FRI statistics predicted using HadGEM3-RA for RCP 8.5

Case	Present	2030	2050	2080
Mean	0.5623	0.5469	0.5254	0.5636
Max	0.2018	0.1814	0.1799	0.1895
Min	0.8538	0.8063	0.7873	0.8635

승하고 금강산댐과 같이 홍수에 노출된 요소가 적은 지역에서의 위험도는 감소한다. 기상청의 기후 시나리오들을 분석해 수도권과 부산 지역의 일 가능최대강수량(Probable Maximum Precipitation, PMP)의 증가율은 다른 비도시 지역에 비해 상대적으로 높을 것으로 전망된다는 이전의 연구 결과를 참고해 본다면(Sim *et al.*, 2015), 도시 지역의 경우 비도시 지역보다 홍수위험도가 더 많이 증가할 가능성은 높아 보이며, 따라서 도심 홍수로 인한 피해도 더욱 심화될 것으로 예상된다. 그리고 Kim *et al.* (2018)은 인구밀도와 발전수준이 홍수 피해의 주된 요인이며 도시 규모가 비슷한 경우 내륙보다 해안지방의 홍수 피해가 더 클 것이라고 서술하고 있는데, 이는 본 연구에서 수행한 홍수위험도 평가와 비슷한 양상이다. 가장 큰 도시

인 서울을 제외한다면, 부산 수영강, 한강서해, 신안군 등 바다와 인접한 지역에서의 홍수위험도가 내륙의 다른 도시지역보다 더 높게 산정되었다.

### 3.4.2 미래 홍수위험도의 시간적 변화

RCP 4.5 시나리오의 전국 평균값을 보면, 2030년대에는 현재보다 낮아졌다가 시간이 지날수록 점차 증가하여 2080년대가 되어야 현재 대비 다소 높아지는 것을 알 수 있다. RCP 8.5 시나리오의 경우 전국 위험도 평균은 2050년대까지 감소하였다가 2080년대에 급증하여 현재보다도 높은 평균값을 갖게 된다. 탄소 배출량이 현재보다 심각해진다면 오히려 21세기 중반까지는 홍수위험도가 감소한다는 의미이다. 내성

천 중권역은 두 RCP 시나리오에서 모두 미래로 갈수록 위험도가 가장 크게 증가한 지역이므로 치수 대책 마련이 시급한 것으로 판단된다. 또한, 미래로 갈수록 홍수위험도 변동이 가장 심한 중권역은 각각 RCP 4.5에선 시화호, RCP 8.5에선 남해도이다. 이 두 지역의 홍수위험도는 각각 평균 0.79, 0.71로 상대적으로 큰 편인데다가 변동도 심하므로 유연한 홍수 대책이 필요할 것으로 판단된다.

21세기 초중반에는 홍수 위험도가 현재 대비 다소 감소하였고 먼 미래인 2080년대에 크게 상승하지 않았는데 시나리오에서 발현되는 이는 위해지표 요소들의 미래 경향이 반영되었기 때문이다. 남한에서의 위해지표 요소 미래 경향성을 나타낸 Fig. 7을 살펴보면, 10년 이동 평균(10 year moving average)이 현재 대비 21세기 초중반에 감소하였다가 서서히 증가하고 있다. 21세기 후반에도 현재 수준과 비슷해지는 것은 RCP 8.5 시나리오의 연 1일 최대와 3일 최대 강수량 두가지이다. HadGEM3-RA의 연 강수량이 다른 국가 표준 기후 시나리오(RegCM4, SNURCM, GRIMs, WRF) 대비 중앙값이 가장 작고 시간에 따른 상승 폭도 작는데(Kim *et al.*, 2015), 이러한 시나리오의 강수 특성이 본 연구에서 전망한 홍수위험도에서도 반영된 것으로 해석된다. 다른 국가 표준 기후 시나리오들은 이와는 달리 일 가능최대강수량이 미래로 갈수록 전국적으로 지속적으로 증가하며(Kim *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2013), ETCCDI로 분석한 미래 강수 극한 사상의 빈도와 규모 또한 지속적으로 증가하고 한다고 보고된 바 있다(Jeung

*et al.*, 2019). 타 연구들의 이러한 강수 전망 사례를 참고해보면, 미래의 홍수위험도 변화 추이를 더욱 깊이 고찰하기 위해서는 다양한 기후 시나리오를 적용한 위험도 평가가 필히 이루어져야 한다.

### 4. 결론

기후변화로 인하여 국내 홍수 발생 가능성은 계속 증가할 것으로 예상되는바, 이에 대한 적응 대책을 세우기 위해서는 홍수위험도 평가가 선행되어야 한다. 국제적으로도 IPCC (2014)에서 제시한 위험도 개념을 차용해 기후변화로 인한 홍수의 위험도를 평가하고 있지만 평가의 신뢰도를 검증하기 위한 자료가 미흡하며, 국내에서는 국지적으로 수행되고 있는 까닭에 각 지역마다 기준이 상이한 실정이다. 이에 본 연구는 전국의 홍수위험도를 일괄적으로 평가할 수 있는 체계를 제시하고 타당성 확보를 위한 검증을 완료하여 국가 단위 적응 대책 수립 시 참고할 수 있도록 FRI를 산정했다.

IPCC AR5를 참고해 '예상되는 위해로 인하여 발생할 잠재적인 피해량'이란 개념으로 위험도를 정의했으며 위해, 노출, 대응능력 세 가지 지표의 조합으로 평가하는 체계를 확립했다. 홍수의 경우 위해는 강수량, 노출은 인명 및 재산, 대응능력은 피해를 경감시킬 사회·경제적 기반을 나타내며, 여기서 위해와 노출은 홍수위험도를 증가시키지만 대응능력은 감소시

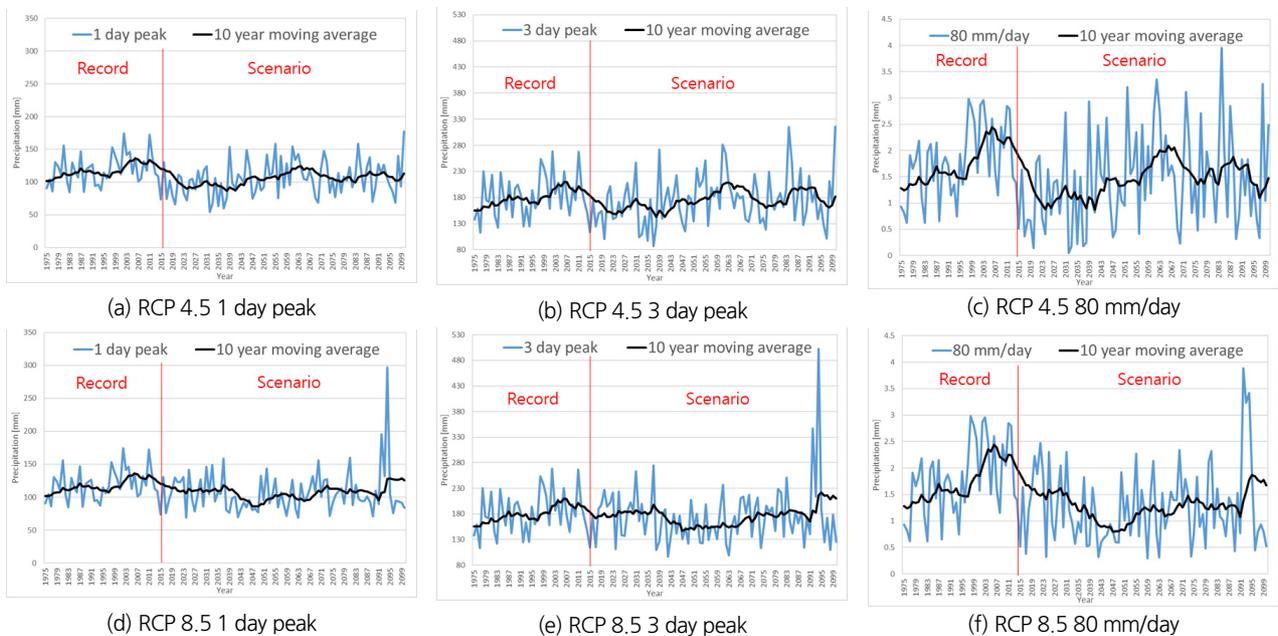


Fig. 7. Trends of hazard components with HadGEM3-RA

키는 지표이다. 국내 실정에 적합하도록 총 26개의 요소를 선정하였고, 2007~2016 동안의 홍수피해액 자료를 활용해 요소들의 가중치를 부여하여 현재 시점을 잘 표현할 수 있도록 FRI를 산정하였다. 부여된 가중치의 값이 최적해인지 여부를 알 수는 없으나, 시행착오를 통해서 점차 신뢰도가 향상되는 것을 확인하여 적절한 가중치 부여는 위험도 평가를 더 믿을 수 있게 한다는 것을 확인했다. 전국 113개 중권역의 FRI와 피해자료 간 스피어만 상관성 분석을 실시한 결과 FRI는 현재의 잠재적 홍수피해량을 적절히 표현하고 있었다. 하지만, 태풍처럼 우발적으로 홍수피해가 발생하는 경우에는 신뢰도가 저하되었는데, 이는 강수 기후를 통해 추정할 수 있는 홍수위험도에 초점을 맞추어 평가가 이루어지기 때문이다. 이를 보완하기 위해서는 홍수 원인별로 각각 홍수 위험도를 평가하는 연구가 진행되어야 한다. FRI에서 가장 지배적인 요소는 노출이었고, 위해는 지역별 편차가 크지 않았으며 대응능력은 자연적 요인 때문에 노출이 적은 산간지역에서 높은 경향이 있었다. 이 때문에 서울과 해운대 등 큰 도시가 위치한 지역의 홍수위험도가 매우 크게 나타났다. 또한, FRI는 다른 연구에서 산정된 홍수지수들(Son et al., 2011; Kang and Lee, 2012; Joo et al., 2018) 보다 대상 범위가 넓기 때문에 신뢰도 측면에서 다소 한계가 있을 수 있다. 하지만, 기후변화 관점에서 위험도를 정의한 IPCC AR5의 개념에 기반을 두었기 때문에 기후변화로 인한 미래 홍수위험도 평가에 매우 적합하며, 동일한 기준으로 전국을 평가하기 때문에 다른 지수와는 달리 국가단위에서 홍수 대책을 수립하기 위한 기초자료로 참고 될 수 있다는 장점이 있다. 추후에 현재 구축된 전국단위 평가방법에 정교한 가중치 최적화 기법을 적용하는 연구를 진행하게 된다면 신뢰도 측면에서도 우수한 홍수 위험도 평가가 가능할 것으로 기대된다.

미래 홍수위험도 평가를 위해 HadGEM3-RA 기반 RCP 4.5, 8.5 시나리오를 투영한 결과, 21세기 초의 홍수위험도는 현재 대비 감소하였지만 이후 꾸준히 증가하여 2080년대에는 현재보다 심각할 것으로 예상된다. 그리고 도시 지역의 위험도는 상승하고 금강산댐 같이 노출이 적은 지역의 위험도는 감소하였는데, 이는 지역 간 편차가 심화되며 도심 홍수로 인한 피해가 더 증가할 수 있다는 의미이다. 미래 FRI 전망의 공간적인 분포 특성은 타 기후변화 연구 결과들과 유사하지만 시간적 변화 추세는 약간의 차이가 존재한다. 이는 하나의 시나리오만을 활용한 본 연구의 한계점으로, 추후 연구로써 다양한 기후 시나리오를 투영해 미래를 전망한다면 미래 홍수위험도 변화 추이에 관한 더 깊은 분석과 고찰이 가능할 것이다. 또한, 미래 전망 연구에서 요소 가중치는 동일하게 부여되기도 하지만 본 연구에서는 노출, 대응능력 지표가 미래에도 현

재와 같고 세 지표의 영향들 또한 같다는 가정을 바탕으로 가중치를 부여했다. 더 나아가, 노출과 대응능력도 미래 시나리오로 투영해 미래 위험도를 평가하는 방법도 생각해볼 수 있지만, 이미 기후변화 시나리오로 인한 불확실성이 매우 큰 상황에서 또 다른 불확실성을 더해주기 때문에 각별한 주의가 필요할 것으로 생각된다.

## 감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견 주신 심사위원께 감사드립니다. 이 연구는 환경부 기후변화대응 환경기술개발사업(과제번호 2014001310007)과 한국연구재단의 BK21 PLUS 사업의 지원으로 수행되었습니다.

## Reference

- Balica, S.F., Douben, N., and Wright, N.G. (2009). "Flood vulnerability indices at varying spatial scales." *Water science and Technology*, Vol. 60, No. 10, pp. 2571-2580.
- Balica, S.F., Popescu, I., Beevers, L., and Wright, N.G. (2013). "Parametric and physically based modelling techniques for flood risk and vulnerability assessment: A comparison." *Environmental modelling and software*, Vol. 41, pp. 84-92.
- Birkmann, J. (2007). "Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications." *Environmental hazards*, Vol. 7, No. 1, pp. 20-31.
- Birkmann, J. (2011). "First-and second-order adaptation to natural hazards and extreme events in the context of climate change." *Natural Hazards*, Vol. 58, No. 2, pp. 811-840.
- Brooks, N. (2003). "Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework." *Tyndall Centre for Climate Change Research Working Paper*, Vol. 38, No. 38, pp. 1-16.
- Ghafouri-Azar, M., and Bae, D.-H. (2018). "Streamflow response to climate change during the wet and dry season in South Korea under a CMIP5 climate model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. S-1, pp. 1091-1103.
- Huang, B., Polanski, S., and Cubasch, U. (2015). "Assessment of precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-East Asia regional climate simulations." *Climate Research*, Vol. 64, pp. 141-158.
- International Panel on Climate Change (IPCC) (2007). *IPCC fourth assessment report: WG2*. Geneva, pp. 23-78.
- International Panel on Climate Change (IPCC) (2014). *IPCC fifth assessment report: WG2*. Geneva, pp. 37-94.
- Jang, O.J., and Kim, Y.-O. (2009). "Flood risk estimation using regional regression analysis." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9 No. 4, pp. 71-80.

- Jeung, S., Park, J., Yang, J., and Kim, B. (2019). "The future of extreme climate change in the Korean peninsula using national standard climate change scenarios and the ETCCDI index." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 7, pp. 105-115.
- Joo, H., Hong, S., Kim, K., Kim, S., and Kim, H.S. (2018). "Integrated index for flood risk assessment development using Bayesian network." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 6, pp. 269-281.
- Jung, S.W., Lee, D.H., Moon, Y.J., and Kim, K.H. (2001). "Potential flood damage (PFD) assessment." *Proceedings of the Korea water resources association conference*, pp. 601-606.
- Kang, J.E., and Lee, M.J. (2012). "Assessment of flood vulnerability to climate change using fuzzy model and GIS in Seoul." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 15, No. 3, pp. 119-136.
- Kim, D., Choi, C., Kim, J., Lee, J., Bae, Y., and Kim, H., S. (2018). "Analysis of heavy rain damage considering regional characteristics." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 4, pp. 311-320.
- Kim, D.K., Kim, Y.S., Hong, S.J., Ly, S., Jung, Y., and Kim, H.S. (2013). "The ETCCDI and frequency analysis using RCP scenarios." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 15, No. 4, pp. 595-607.
- Kim, J., Park, M., and Joo, J. (2015). "Comparison of characteristics and spatial distribution tendency of daily precipitation based on the regional climate models for Korean Peninsula." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 4, pp. 59-70.
- Kim, J.H., and Kim, Y.-O. (2003). "Improving potential flood damage." *Annual Meeting of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, pp. 2373-2378.
- Kim, K., Lee, J., Keum, J., Park, M., and Kim, S. (2018). "Uncertainty of future intensity-duration-frequency curves using multi-regional climate models." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 6, pp. 405-416.
- Kim, M., and Kim, G. (2018). "Analysis of the applicability of flood risk indices according to flood damage types." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 38, No. 1, pp. 29-39.
- Kim, Y., Lee, B., and Kim, T. (2019). "Development of a Typhoon Risk Index (TRI) based on records of typhoon damage." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 7, pp. 501-509.
- Lee, J.J., Lee, J.S., Kim, B.I., and Park, J.Y. (2000). "Derivation of probable rainfall formula of individual zone based on the representative probability distribution." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 33, No. S1, pp. 124-129.
- Lim, K.S., Choi, S.J., Lee, D.R., and Moon, J.W. (2010). "Development of flood risk index using causal relationships of flood indicators." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 1B, pp. 61-70.
- Ministry of Environment (ME) (2014). *Korean climate change assessment report 2014*. Korea, pp. 4-31.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2006). *Estimation of potential urban flood risk and damage (II)*. Korea, pp. 2-33.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2016). *Water Vision 2020 3rd edition*. Korea, pp. 83-89.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS) (2017). *2017 Statistical yearbook of natural disaster*. Korea, pp. 1-133.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (1993). *Core set of indicators for environmental performance reviews: A synthesis report by the group on the state of the environment. environment monographs*, Vol. 83. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, pp. 1-39.
- Oh, S.-G., Suh, M.-S., Lee, Y.-S., Ahn, J.-B., Cha, D.-H., Lee, D.-K., Hong, S.-Y., Min, S.-K., Park, S.-C., and Kang, H.-S. (2016). "Projections of high resolution climate changes for South Korea using multiple-regional climate models based on four RCP scenarios. Part 2: Precipitation." *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 52, No. 2, pp. 171-189.
- Rovai, A.P., Baker, J.D., and Ponton, M.K. (2013). *Social science research design and statistics: A practitioner's guide to research methods and IBM SPSS*. Watertree Press LLC, Chesapeake, V.A, U.S., pp. 375-378.
- Sim, K.B., Lee, O., Kim, S., and Kim, E.S. (2015). "1-day probable maximum precipitation in accordance with AR5 RCPs in Korea." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 4, pp. 273-280.
- Son, M.W., Sung, J.Y., Chung, E.S., and Jun, K.S. (2011). "Development of flood vulnerability index considering climate change." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 3, pp. 231-248.
- Sorg, L., Medina, N., Feldmeyer, D., Sanchez, A., Vojinovic, Z., Birkmann, J., and Marchese, A. (2018). "Capturing the multifaceted phenomena of socioeconomic vulnerability." *Natural Hazards*, Vol. 92, No. 1, pp. 257-282.
- Tsakiris, G. (2007). "Practical application of risk and hazard concepts in proactive planning." *European Water*, Vol. 19, No. 20, pp. 47-56.
- Tsakiris, G. (2014). "Flood risk assessment: Concepts, modelling, applications." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 14, No. 5, pp. 1361-1369.
- Turner, B.L., Kasperson, R.E., Matson, P.A., McCarthy, J.J., Corell, R.W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J.X., Luers, A., Martello, M.L., Polsky, C., Pulsipher, A., and Schiller, A. (2003). "A framework for vulnerability analysis in sustainability science." *Proceedings of the national academy of sciences*, Vol. 100, No. 14, pp. 8074-8079.
- Vojinovic, Z., Hammond, M., Golub, D., Hirunsalee, S., Weesakul, S., Meesuk, V., Medina, N., Sanchez, A., Kumara, S., and Abbott, M. (2016). "Holistic approach to flood risk assessment in areas with cultural heritage: A practical application in Ayutthaya, Thailand." *Natural Hazards*, Vol. 81, No. 1, pp. 589-616.
- Welle, T., and Birkmann, J. (2015). "The world risk index-an approach to assess risk and vulnerability on a global scale." *Journal of Extreme Events*, Vol. 2, No. 1, 1550003.