

Study Note

## 생태계서비스 계정화를 위한 홍수의 잠재적 피해 평가

이태호 · 문희진 · 이지민 · 천금성

국립생태원

### Assessing Potential Damage of Flood Events for Ecosystem Service Account

Tae-Ho Lee · Hee-Jin Moon · Ji-Min Lee · Gum-Sung Cheon

National Institute of Ecology

**요약:** 생태계는 인간에게 다양한 방식으로 혜택을 제공한다. 생태계서비스는 이러한 개념을 포함하고 있으며, 이를 평가하는 것은 그 혜택을 정량화하거나 가치화하는 과정을 포함한다. 생태계서비스 계정화는 국가계정과 마찬가지로 측정된 결과를 지속해서 모니터링하고, 연간 변화량을 파악하게 함으로써 정책 의사결정을 지원할 수 있는 객관적 자료로 활용될 수 있는 체계이다.

기후변화와 함께 홍수발생 빈도와 크기가 증가함으로써 자연 기반의 홍수 완화 기능에 대한 관심이 증가하고 있다. 생태계가 제공하는 이러한 혜택적 측면에 대해 계정화를 고려하여 평가하기 위해서는 생태계의 '잠재적 공급능력', '인간의 수요' 그리고 '양적 흐름(이용량)' 세 가지 요소와 그들 사이의 관계를 고려해야 한다. 기존 연구에서는 홍수조절에 기여하는 생태계 공급능력과 그로 인해 혜택을 받는 수요에 대한 정의 및 방법론 연구가 일부 진행되었다. 그러나 그 흐름에 대한 실제적 정량화 및 경제적 평가가 이뤄지지 않아 연구 결과의 활용성이 제한적이다.

본 연구에서는 유역 상류의 홍수조절 생태계서비스 흐름을 홍수범람 예상지역을 대상으로 토지특성별 피해함수값을 적용하여 화폐 가치로 그 혜택을 추산하였다. 연구 결과 재현기간 500년 빈도 강우 시 국가가 받는 유역 상류의 생태계가 하류지역의 홍수범람을 조절하는 생태계서비스 혜택은 연간 총 25조 4,571억 원으로 산정되었다. 발생확률을 고려하여 계정화를 위해 1년 단위의 혜택으로 산정하면 약 509억 원이다.

이러한 결과는 유역 상류 생태계 전체가 홍수 기능을 수행하고 있다는 전제와 함께 기존 방재시설에 대한 기능이 이행되지 않는 상황을 가정하고 있다. 향후 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 기존 방재시설을 고려한 서비스 흐름 측정과 다양한 홍수빈도와 발생확률을 고려한 추가 연구가 필요하다.

**주요어:** 생태계 계정화, 홍수조절서비스, 대체비용법, 홍수 깊이-피해함수

**Abstract:** Climate change increases the frequency and intensity of floods, and damage to life and property caused by floods is increasing. Among various alternatives for flood mitigation, interest in nature-based flood mitigation is gradually increasing. Ecosystem service accounting is being discussed

First & Corresponding Author: Tae-Ho Lee, Tel: +82-41-950-5465, E-mail: utome@nie.re.kr, ORCID: 0009-0006-6555-3070

Hee-Jin Moon, Tel: +82-41-950-5455, E-mail: hjmoon5239@nie.re.kr, ORCID: 0009-0004-3801-8174

Co-Authors: Ji-Min Lee, Tel: +82-41-950-5462, E-mail: jimine@nie.re.kr, ORCID: 0009-0006-4460-7084

Gum-Sung Cheon, Tel: +82-41-950-5466, E-mail: rmatjd1024@nie.re.kr, ORCID: 0009-0007-4567-5609

Received: 20 October, 2024. Revised: 25 November, 2024. Accepted: 5 December, 2024.

internationally for the purpose of maintaining and preserving natural ecosystems with flood control functions. In order to account for ecosystem services, evaluation of the relevant services must be conducted first. For evaluation, the three elements of 'potential supply capacity of the ecosystem', 'human demand', and 'flow', which is the amount of benefits, and the relationship between them must be considered. In existing flood control ecosystem service evaluation studies, definitions and methodological studies on ecosystem supply capacity contributing to flood control and demand benefiting from it have been limited. However, actual quantification and monetary evaluation of service flow have not been conducted, so the usability of research results in terms of ecosystem accounting is low.

In this study, flood control ecosystem service flow in a national basin was estimated in monetary value by applying a flood-depth damage function by land characteristics to areas expected to be flooded.

The study results show that the ecosystem service benefits of the upstream ecosystem of the river basin, which controls flooding in the downstream area, received by the country with a 500-year rainfall frequency are estimated to be a total of 25 trillion 4,571 billion per year. If the benefits are calculated as annual units for accounting by considering the occurrence probability, it is approximately 50.9 billion won. These results assume that the entire upstream ecosystem of the river basin performs flood functions and that the functions of existing disaster prevention facilities are not being performed. In future studies, to solve these problems, it is necessary to measure the service flow considering existing disaster prevention facilities and conduct research considering various flood frequencies and occurrence probabilities.

**Keywords:** Ecosystem Account, Flood Regulation Ecosystem Services, Replacement Cost Method, Flood-depth Damage Function

## I. 서론

생태계서비스는 사람들이 생태계로부터 얻는 혜택으로 정의한다(MA 2005). 생태계에서 시작하여 인간 사회에 전달되는 혜택 즉 서비스의 종류와 형태 그리고 그 양은 두 사이의 복잡한 상호작용을 갖는다. De Groot et al.(2010)은 생태계서비스를 공급서비스, 조절서비스, 지지 및 문화서비스로 구분하였다. 이후 20년 동안 생태계서비스는 매우 인기 있는 과학적 주제가 되었다(Burkhard et al. 2010). 그동안 생태계서비스를 평가하는 방법에 대해 많은 논의와 시도가 있었다. 대표적으로 Villanmagan et al.(2013)은 생태계서비스 평가에 있어 다음의 세 가지 구성요소를 제시하였다. 첫 번째는 지속 가능성을 기반으로 생태계서비스를 제공하는 '생태계서비스 잠재력(Potential)', 두 번째는 사회가 요구하는 특정 생태계서비스를 나타내는 '생태계서비스 수요(Demand)' 세 번째는 특정 장소와 시간 동안 이용되는 서비스 이용량인 '생태계서비스 사용(Use)' 또

는 실제 흐름(Actual flow or Use)'이다(Burkhard & Maes 2017). 잠재력 중 공급 역량은 생태계의 속성과 상태 등의 정보를 통해 파악되며, 수요는 이러한 공급 역량을 가진 생태계에 대한 선호도나 가치, 또는 이로부터 받을 수 있는 위험 감소로 측정된다(Wolff et al. 2015). 마지막으로 실제 흐름은 잠재 공급량 가운데 수요자가 실제로 특정 시기와 영역에서 사용하는 양을 의미한다.

기존에는 생태계의 공급 잠재력과 수요에 대한 논의와 비교 연구가 활발하게 이뤄졌다(Nedkov & Burkhard 2012; Schulp et al. 2014). 그러한 결과가 토지계획과 정책지원에 유용한 도구로써 이용될 수 있음을 확인하였다. 그러나 잠재 공급량과 수요 두 사이에서 발생하는 실제 흐름(즉 생태계서비스 이용량)을 정량화 방법은 최근까지도 다양하게 논의 중에 있다. 목재, 식량 같이 시장 경제에 편입된 공급서비스와 달리 수질조절, 재해조절 등과 같은 조절서비스에 대해 실제 이용량을 시간 및 공간적으로 파악하는 것은 공급, 수요 관계의 복잡성으로 인해 측정하기가 매우 어렵다.

국제적 생물다양성 전략목표에는 생태계가 제공하는 인간에 대한 혜택을 정량화하여 국가계정이나 환경계정처럼 이를 경제분야와 연결하고 이를 관리하고자 하는 내용을 담고 있다. 이를 자연 자본 계정(Natural Capital Account) 또는 생태계 계정(Ecosystem Account) 이라고 하며, 이는 자연 또는 생태계의 크기나 상태 그리고 앞서 언급한 인간사회와 생태계 사이의 생태계서비스 흐름 등을 매년 측정하고 그 변화를 파악하는 것을 목표로 삼는다. 이와 같은 새로운 계정은 국가계정 또는 환경경제통합계정과 통합과 연결성을 위해 기존 원칙과 기준을 준수하도록하며, 따라서 측정과 관리에 있어 공통적이고 일관된 방식을 따른다. 각 국가는 보유한 생태계와 관련 정보, 기술 수준 등의 차이로 인해 획일화된 방법론 적용이 어려울 수 있어 생태계 계정화를 위해서는 국가별 방법론 개발이 요구된다. 국제적으로 보면 EU, 영국, 호주 등에서는 일부 생태계 계정화에 대한 노력과 결과들이 나타나고 있으나, 반면 국내에서는 생태계 계정에 대한 논의가 매우 제한적으로 이뤄지고 있다.

국내외 관련 연구를 살펴보면, 국내에서는 생태계 계정에 대한 연구가 매우 제한적으로 이뤄졌다. Jung et al.(2023)은 유럽 연합 회원국들의 생태계서비스 계정화 연구 동향을 파악하였으며, 일부 생태계서비스에 대해 제한적으로 시도되고 있음을 확인하고, 국내 관련 연구의 필요성을 강조했다. Lee et al.(2023)은 생태계 계정 기반의 전국 유역 단위에서 생태계의 홍수조절서비스에 대한 시범 평가를 실시하여 서비스의 실제 흐름 및 이용을 물리량 단위로 평가하고자 하였으나, 향후 환경경제통합계정과 연계성 등을 고려하여 유럽과 마찬가지로 화폐적 단위의 산정 중요성을 강조하였다. 국외에서는 홍수조절서비스 평가에 대한 연구가 일부 이뤄졌으나 연구 대상 및 목적에 있어 차이를 보이고 있다. Wubbelmann et al.(2023)은 기후변화에서 생태계가 주는 도시 공간에서의 홍수조절 생태계서비스의 의의와 효과를 평가하였다. Barth(2016)은 생태계의 홍수 기능이 없는 경우를 가정하여 수변식생이 제공하는 홍수조절서비스에 대해 교체비용과 회피비용 방법을 사용하여 경제적 가치를 평가하였다. Nedkov et al.(2012)은 홍수조절 생태계서비스 공급과 수요 측

면에서 상호 균형 및 교차관계를 파악하여 편익 관계에서 정책적 시사점을 제시하였다. Mori et al.(2021)은 홍수조절서비스에 대한 시공간적 역동성을 평가하기 위한 방법론을 제시하였으며, 시간적으로 홍수조절의 생태계가 공급 수요 측면에서 어떻게 변화하는지 파악하였다.

따라서 본 연구는 홍수조절 생태계서비스 계정화의 마지막 단계인 홍수조절 생태계서비스의 잠재적 경제 가치 평가를 목적으로 하며, 이를 통해 기존 연구 보완과 국가 단위에서의 정책적 의사결정 지원 도구로서의 기능 활용성을 높이고자 한다.

## II. 연구방법

### 1 연구의 방법 및 절차

#### 1) 연구의 방법

홍수는 호우 강도, 지속시간 및 지역적 특성에 따라 하천홍수(River Flood), 도시홍수(Urban Flood), 돌발홍수(Flash Flood) 해안홍수(Coastal Flood) 4가지 유형으로 구분한다. 홍수 발생으로 인한 재산의 잠재적 피해를 평가하는 것은 홍수 위험 관리의 중요 구성요소이다. 본 연구에서는 하천홍수 피해를 방지하기 위해 생태계가 제공하는 홍수조절서비스량을 화폐 가치로 측정하였다. 측정에 사용된 회피비용법은 자연재해나 환경 오염으로부터 스스로를 보호하기 위하여 지출하는 비용을 재해 방지 투자에서 얻는 편익으로 간주하는 방법이다. 유역 상류 생태계의 구성 요소인 토양이나 토지피복 식생 등은 하류하천의 침수 피해 방재 역할을 하며, 이 방재 기능이 상실될 경우를 가정하여 발생하는 잠재적 피해값을 상류 자연 생태계 비용 및 편익으로 간주하였다.

일반적으로 홍수로 인한 직접적 피해 산정은 홍수 깊이-피해 곡선(Flood Depth Damage Curves)을 사용한다. 이는 홍수 시 잠긴 지역의 물 깊이와 그로 인해 발생한 피해액과의 선형 관계를 나타낸 식이다. 이러한 곡선식을 개발하기 위해서는 해당 지역이나 국가에서 홍수 시 조사된 피해액 자료를 기반으로 한다. 그러나 많은 각 국가에서 극한 강우를 경험하지 않았거나, 그

에 따른 정보가 제한적이어서 FDDC를 활용하는데 한계가 있다.

본 연구에서 이용한 전세계 홍수 깊이-피해 함수(Global Flood Depth-Damage Functions, 이하 GFDDF)는 Huizinga et al.(2017)가 전 세계 관련 연구 데이터를 토대로 개발하였으며, 이 방법은 광범위한 문헌조사를 토대로 국가가 홍수 피해 특성을 반영하고 있다. 이는 다국적 건설 회사의 건설비용, 사회·경제적 지표 등을 포함하며, 도시 및 농촌지역 특성에 피해액 특성을 반영할 수 있도록 하여 관련 데이터가 구축되지 않는 국가의 활용성이 높다. GFDDF는 크게 주거용 건물, 상업, 산업, 운송, 인프라(도로), 그리고 농업으로 구분되며, 전 세계 홍수 피해 자료를 토대로, 최대 피해값에 대한 함수값을 생성한다. GFDDF는 0~6M 이상의 침수깊이 사이의 등급으로 구분하였으며, 구간별 가중치값을 제공하였다. 각 값은 6개 대륙에 대한 대륙값과 국가별 특성에 따라 선택적으로 적용할 수 있다.

피해 최댓값 산정은 주거, 상업, 공업 분야의 경우 크게 건물(구조, 부속물), 토지 및 객체기반등 세 가지로 구분되어 있어 자료활용성 및 산정 대상의 특성에 맞게 적용할 수 있다. 농업분야 피해 최댓값은 2008-2012 농업부문 헥타르당 평균 부가가치값 자료(www.index.go.kr)를 이용하였으며, 인프라(도로)는 전 세계와 대륙 GDP 값을 이용하여 최대 피해값을 보정하여 산정하였다. 본 연구에서는 토지기반 원단위를 기준으로 잠재적 피해액을 산정하였으며, 농업, 도로 인프라는 국내 값을 이용하였다.

침수 깊이에 대한 정보는 정부의 2015 홍수범람지도를 이용하였다. 홍수범람지도는 환경부 홍수위험지도 정보시스템(www.floodmap.go.kr)에서 제공하고 있으며, 국가하천 및 지방하천을 대상으로 극한 한강

우조건과 월류 및 붕괴 등 극한상황에 따른 홍수발생시 예상되는 침수범위와 침수깊이를 나타내고 있다. 해당 지도는 범람 피해 검증, 예측, 치수 시설 비용-편익 효과 판단, 토지이용 관리 등을 볼 수 있으며(건설교통부, 한국수자원 공사 2001) 침수 예상 지역에 대한 토지이용 및 피복 정보는 환경부의 증분류 및 세분류 토지피복도를 활용하여, 주거, 상업, 공업, 농경지, 도로 공간 정보를 추출하였다.

본 연구에서는 국가하천을 대상으로 하고 있으며, 홍수량 산정 및 하천재방 시설 설치 기준에 있어 최고 재현기간인 500년 빈도 강우 시 발생하는 침수에 대한 잠재적 피해액을 산정하였다. 이는 기존 홍수방재 방재시설이 하는 역할 이외의 부분만을 생태계서비스로 측정하였다.

## 2) 연구의 절차

연구 수행을 위해 기존 문헌에서 제시한 생태계 계정 체계에서의 홍수조절서비스 개념 등을 우선적으로 검토하였으며, 기존 연구(Lee et al. 2023)와의 공간 및 시간적 범위를 일치시켰다. 기존 연구에서는 서비스 혜택 면적으로 최종 생태계서비스 물리량 값으로 제시하였다면, 본 연구에서는 회피비용법을 이용하여 화폐 가치로 환산하기 위해 깊이-피해 함수와 최대피해값을 토지 특성별로 적용하였다. 최종적인 경제가치 결과는 23개의 대권역을 중심으로 산정하였다. 본 연구의 흐름 및 절차는 Figure 1과 같다.

## 2. 연구의 재료

### 1) 연구 대상지 현황

기존 연구와 마찬가지로 국가 단위에서 생태계 계정 정보를 생성하기 위한 목적을 고려하여 전국의 대권역

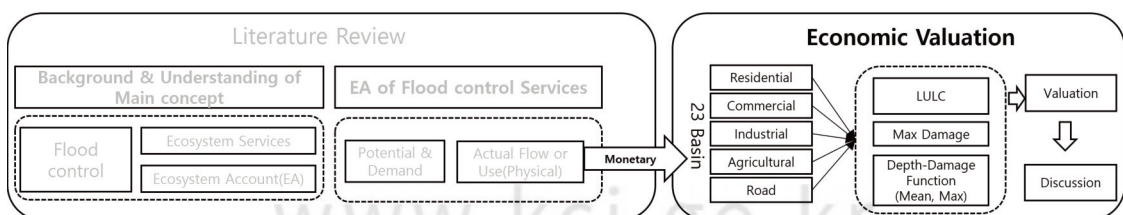


Figure 1. The process of this study

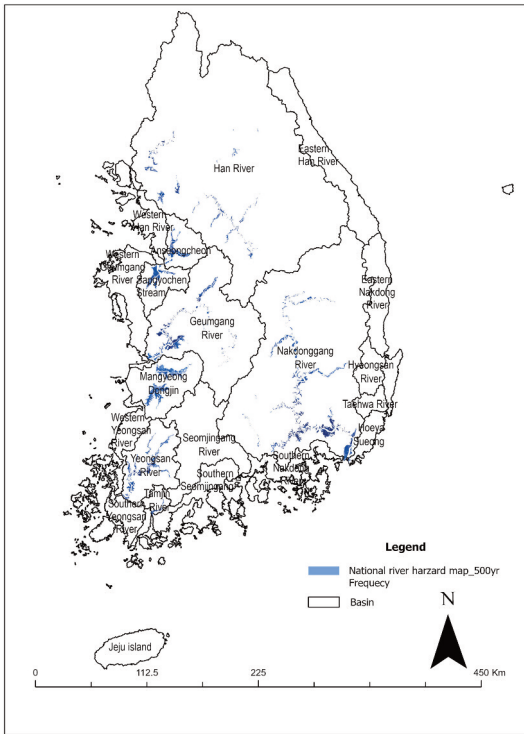


Figure 2. The research site

단위의 유역을 연구 대상으로 설정하였다. 국가하천 중심의 대권역은 한반도에서 남한에 관하여 일반적인 5대강(한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강)을 기준으로 하여, 산맥에 의한 자연 발생한 대하천을 중심으로 나누고 있으며, 21개 대권역으로 구분한다. 국내 대권역 분포 현황과 500년 빈도 강우 시 홍수 범람 예상 지역은 아래와 같다. 침수가 예상되는 연구 대상지의 전체면

적은 2,382km<sup>2</sup>이다.

Figure 3은 만경·동진강 유역의 홍수 발생 예측 지점을 공간적으로 보여주고 있다. 지도에서는 지역별 침수 깊이 등급의 분포 현황을 나타내고 있으며, 하천과의 거리에 따른 차이를 보여준다. Figure 4는 낙동강 주변 지역 가운데에 침수 발생 지역의 토지이용 및 피복(LULC, Land Use and Land Cover)을 보여주고 있다. 본 연구에서 피해 함수의 활용성을 고려하여 침수가 발생하는 지역 가운데, 주거, 상업, 공업, 농업, 도로 지역을 추출하여 연구 대상지로 설정하였다.

유역별 홍수 범람에 따른 침수 예상지역의 유역별 토지이용 현황은 Table 1과 같다. 5개 대권역으로 구분할 때 모든 권역에서 침수가 발생하는 것으로 나타났으며, 5개의 대권역을 구성하는 한강(서해, 동해), 형산강, 태화강, 낙동강(동해), 금강(서해), 섬진강, 탐진강, 영산강(서해), 제주도와 같은 일부 유역에서는 침수가 발생하지 않는 것으로 확인되었다. 유역별 면적 특성을 살펴보면, 낙동강에 도시기반 시설이 높게 집중되어 있음을 확인할 수 있었다.

농업부문에서의 유역별 분포 특성을 살펴보면 한강(동해, 서해), 형산강, 태화강, 낙동강(동해), 금강(서해), 영산강(서해), 제주도는 경작지의 침수 피해가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 또한, 회야·수영, 영산강(남해) 역시 피해 면적이 상대적으로 매우 작게 조사되었다. 한강을 제외한 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강 유역에 상대적으로 넓은 면적의 경작지가 침수되는 것으로 나타났다. 이 가운데서도 특히 금강, 삼포천, 만경·동진강

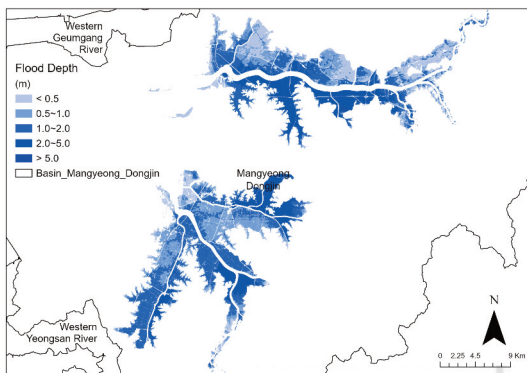


Figure 3. Flood depth map (ex. Dongjing-Mangyeong river basin)

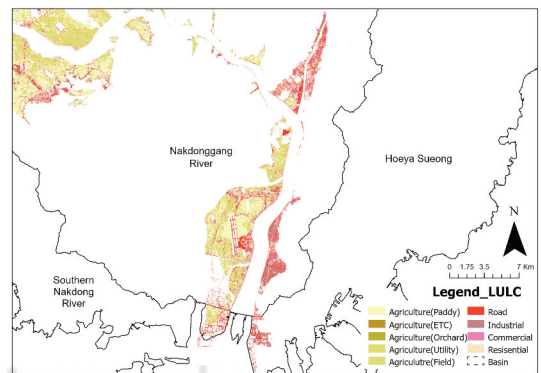


Figure 4. LULC map (ex. Nakdong river basin)

Table 1. LULC characteristics(artificial surface) according to the 21 basins

Basin		Land Use & Land Cover							
		Residential		Commercial		Industrial		Road (Infra)	
		Area (m <sup>2</sup> )	Ratio (%)	Area (m <sup>2</sup> )	Ratio (%)	Area (m <sup>2</sup> )	Ratio (%)	Area (m <sup>2</sup> )	Ratio (%)
Han River	Han River	12,132,189	17.73	11,746,258	17.17	1,950,516	2.85	42,591,055	62.25
	Anseong Stream	1,423,687	9.26	1,842,790	11.99	826,732	5.38	11,276,891	73.37
	West of Han River	-	-	-	-	-	-	-	-
	East of Han River	-	-	-	-	-	-	-	-
Nakdong River	Nakdong River	14,932,752	11.74	13,793,198	10.84	18,705,111	14.71	79,766,854	62.71
	Hyeongsan River	-	-	-	-	-	-	-	-
	Taehwa River	-	-	-	-	-	-	-	-
	Hoeya-Suyeong	195,498	7.00	365,462	13.08	824,966	29.54	1,407,115	50.38
Geum River	East of Nakdong River	-	-	-	-	-	-	-	-
	South of Nakdong River	182,643	9.46	200,480	10.38	10,441	0.54	1,537,686	79.62
	Geum River	3,851,034	12.04	3,203,809	10.01	2,074,711	6.48	22,863,956	71.46
	Sapgyo Stream	1,182,689	15.93	490,227	6.60	224,793	3.03	5,525,772	74.44
Seomjin River	West of Geum River	-	-	-	-	-	-	8	100
	Mangyeong-Dongjin River	2,775,295	12.04	2,394,163	10.39	774,506	3.36	17,105,819	74.21
	Seomjin River	-	-	-	-	-	-	-	-
	Southern Seomjin River	34,459	15.56	20,323	9.18	-	-	166,615	75.26
Yeongsan River	Yeongsan River	2,364,854	9.42	2,463,891	9.82	1,361,164	5.42	18,903,422	75.33
	Tamjin River	267,846	15.18	205,105	11.62	9,070	0.51	1,282,970	72.69
	South of Yeongsan River	290	15.54	-	-	-	-	1,576	84.46
	West of Yeongsan River	-	-	-	-	-	-	-	-
Jeju Island		-	-	-	-	-	-	-	-
Total		39,343,236		36,725,706		26,762,010		202,429,739	

Table 2. LULC characteristics(Agricultural) according to the 21 Basins

Basin		Land Use & Land Cover									
		Paddy <sup>1)</sup>		Field <sup>2)</sup>		Utility <sup>3)</sup>		Orchard <sup>4)</sup>		ETC <sup>5)</sup>	
		Area (m <sup>2</sup> )	Ratio (%)	Area (m <sup>2</sup> )	Ratio (%)	Area (m <sup>2</sup> )	Ratio (%)	Area (m <sup>2</sup> )	Ratio (%)	Area (m <sup>2</sup> )	Ratio (%)
Han River	Han River	77,414,915	68.33	21,883,801	19.32	11,196,297	9.88	1,541,195	1.36	1,259,381	1.11
	Anseong Stream	87,968,335	88.56	5,515,236	5.55	3,840,780	3.87	386,146	0.39	1,616,962	1.63
	West of Han River	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	East of Han River	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nakdong River	Nakdong River	238,493,372	56.37	62,844,311	14.85	98,857,753	23.37	17,842,752	4.22	5,043,194	1.19
	Hyeongsan River	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Taehwa River	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Hoeya·Suyeong	-	-	3,706	100	-	-	-	-	-	-
	East of Nakdong River	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	South of Nakdong River	971,454	42.84	1,105,739	48.76	187,070	8.25	2,491	0.11	1,116	0.05
Geum River	Geum River	170,345,684	72.95	19,317,162	8.27	38,248,116	16.38	2,758,295	1.18	2,853,028	1.22
	Sapgyo Stream	103,015,261	91.82	2,991,383	2.67	5,325,055	4.75	246,626	0.22	617,644	0.55
	West of Geum River	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mangyeong-Dongjin River	260,288,811	91.37	12,745,563	4.47	9,023,239	3.17	896,230	0.31	1,923,518	0.68
Seomjin River	Seomjin River	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Southern Seomjin River	1,731,827	89.80	55,605	2.88	115,913	6.01	-	-	25,281	1.31
Yeongsan River	Yeongsan River	147,175,496	81.83	10,966,058	6.10	15,950,341	8.87	3,767,960	2.10	1,985,748	1.10
	Tamjin River	13,998,866	91.31	793,941	5.18	277,833	1.81	53,131	0.35	208,027	1.36
	South of Yeongsan River	283	39.64	431	60.36	-	-	-	-	-	-
	West of Yeongsan River	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jeju Island		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		1,101,404,305		138,222,938		183,022,400		27,494,830		15,533,904	

1) Water-used land for rice cultivation

2) Land for cultivating crops other than rice without irrigation

3) Cultivation area with facilities such as plastic, glass, or metal structures

4) Orchard for various fruits

5) Livestock and dairy facilities

Table 3. The status of LULC by Flood-depth level

	Flood-depth Level									
	FD<0.5m		0.5m≤FD<1.0m		1.0m≤FD<2.0m		2.0m≤FD<5.0m		FD≥5.0m	
	Area (km <sup>2</sup> )	Ratio (%)	Area (km <sup>2</sup> )	Ratio (%)	Area (km <sup>2</sup> )	Ratio (%)	Area (km <sup>2</sup> )	Ratio (%)	Area (km <sup>2</sup> )	Ratio (%)
Residential	7.12	4.36	4.95	2.65	8.27	2.21	15.45	2.17	3.59	1.07
Commercial	5.73	3.51	4.46	2.39	6.76	1.80	15.64	2.20	4.15	1.24
Industrial	4.12	2.53	2.82	1.51	4.56	1.22	13.13	1.84	2.14	0.64
Road(Infra)	32.3	19.80	25.5	13.68	40.3	10.76	78.3	10.99	26.3	7.86
Agricultural	113.86	69.80	148.73	79.77	314.72	84.01	589.76	82.8	298.61	89.19
Total	163.13	100	186.46	100	374.61	100	712.28	100	334.79	100

유역을 포함하는 금강 대권역이 가장 높게 나타났다 (Table 2).

침수심에 따른 토지이용 면적 분포 현황을 살펴 보면 전체 침수면적은 1770.67km<sup>2</sup>로 나타났다. 침수 깊이에 따른 면적을 살펴보면, 0.5m 미만이 163.13km<sup>2</sup>, 0.5m 이상~1.0m 미만이 186.46km<sup>2</sup>, 1.0m 이상~2.0m 미만이 374.61km<sup>2</sup>, 2.0m 이상~5.0m 미만이 712.28km<sup>2</sup>, 5.0m 이상이 334.79km<sup>2</sup>로 나타났다. 상대적으로 농경지의 침수면적 비율이 높게 나타났다. 또한 2.0m 이상~5.0m 미만 침수되는 면적 높은 비중을 차지했다(Table 3).

2) 경제가치 산정

각 토지 특성별 최대 피해액과 피해 함숫값을 산정하기 위해 주거, 상업, 공업, 인프라(교통), 농업에 대한 공간 정보를 수집하였다. 토지이용과 피복 현황은 환

경부 토지피복도 중분류 지도를 우선적으로 하였으며, 도로에 대한 정보를 세분화하기 위해 세분류 지도를 일부 활용하였다. 중분류 지도에서는 주거(code 110), 공업(code120), 상업(code 130)을 구분하고 있으며, 교통지역(code 150)은 도로 철도를 포함한 관련 부대시설 등을 포함하고 있어 이를 구분하기 위해 세분류 토지피복도를 사용하였다. 세분류 토지피복도는 중분류 교통지역(code 150)을 다시 공항(code 151), 항만(code 152), 철도(code 153), 도로(code 154), 기타 교통·통신 시설(code 155)로 구분하고 있으며, 여기서 도로(code 154)만을 별도로 추출하여 분석에 활용하였다.

침수 깊이에 따른 피해 함수 가중치 값은 국가에서 활용할 수 있는 값을 우선적으로 사용하였으며, 자료가 없을 경우 아시아 대륙값을 이용하였다. 침수심별 피해 가중치는 총 9개의 등급으로 나뉘져 있으며, 6m

Table 4. Damage function values of LULC categories by Water depth

Water depth (m)	Damage class										
	Buildings					Infrastructure				Agriculture	
	Residential		Commercial		Industrial		Roads				
		S.D.		S.D.		S.D.		S.D.		S.D.	
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.5	0.38	0.25	0.28	0.24	0.36	0.24	0.21	0.07	0.14	0.19	
1	0.54	0.22	0.48	0.24	0.57	0.30	0.37	0.07	0.37	0.35	
1.5	0.66	0.21	0.63	0.24	0.73	0.30	0.60	0.21	0.52	0.48	
2	0.76	0.21	0.72	0.25	0.85	0.27	0.71	0.27	0.56	0.46	
3	0.88	0.17	0.86	0.17	1.00	0.23	0.81	0.22	0.66	0.36	
4	0.94	0.12	0.91	0.11	1.00	0.16	0.89	0.13	0.83	0.16	
5	0.98	0.05	0.96	0.05	1.00	0.08	0.97	0.06	0.99	0.03	
6	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	

Table 5. Reclassification of damage function class for the valuation of the research sites

Division		FD<0.5m	0.5m≤FD<1.0m	1.0m≤FD<2.0m	2.0m≤FD<5.0m	FD≥5.0m
Residential	Mean	0.16	0.41	0.61	0.88	1
	Max.	0.33	0.49	0.72	0.98	0.98
commercial	Mean	0.19	0.46	0.65	0.89	1
	Max.	0.38	0.54	0.76	0.98	0.96
Industrial	Mean	0.14	0.38	0.61	0.86	1
	Max.	0.28	0.48	0.72	1	1
Road	Mean	0.11	0.29	0.56	0.84	1
	Max.	0.21	0.57	0.85	0.97	0.97
Agricultural	Mean	0.07	0.25	0.48	0.76	1
	Max.	0.14	0.37	0.56	0.99	0.99

Table 6. Max. damage values as of 2020 for LULC

	Maximum damages value			Description
	2010		2020	
	EUR	KRW	KRW	
Residential	123	188,436	218,208	Maximum damage/m <sup>2</sup>
Commercial	260	398,320	461,254	
Industrial	215	329,380	381,422	
Agricultural	1.1	1685	1,951	
Road (Infrastructure)	0.21	321	372	Value Added/Hectare 10,617 €/Hectare Max damage(country)=continental average max damage x GDP(country)/GDP(continental average)

이상일 경우에 최대 가중치 1 값을 갖는다. 각 구간별 침수 깊이에 따른 피해 등급 가중치는 Table 4와 같다.

침수 깊이에 따른 피해 함수 가중치는 9개의 등급으로 분류되어 있으나, 홍수범람지도의 침수심 구간은 5개 구간으로 나뉘어져 있어, 이를 통합·조정하기 위해 가중치 대푯값을 구간 평균값과 최댓값을 이용하였다 (Table 5).

주거, 상업, 공업, 인프라(도로), 농업에 대한 최대 피해값은 2010년도 기준으로 제시하고 있어, 본 연구에서는 소비자물가지수를 활용하여 2020년 기준으로 화폐 가치를 재산정하였다. Table 6은 변환된 각 카테고리별 제곱미터당 화폐가치와 산정 기준을 설명하고 있다. 2020년 기준 제곱미터당 최대 피해액은 주거 218,208원, 상업 461,254원, 공업 381,422원, 농업 1,951원 도로 372원으로 분석하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 연구결과

홍수범람 지도의 침수심 공간 정보를 기준으로 500년 빈도 강우 시 발생할 수 있는 잠재적 피해액을 산정하였다. 대상면적은 약 1,770.67km<sup>2</sup>로 2020년 화폐가치 기준 피해액을 산정한 결과 전체 침수발생 지역에 대한 잠재적 피해 발생액은 구간별 평균 기준으로 약 27조 9,700억원으로 분석되었다. 구간별 최대 피해 가중치를 적용할 경우에는 약 32조 3,020억원으로 평균 대비 약 115%로 나타났다. 토지특성별 잠재적 피해액을 보면 구간 평균 기준 주거 7조 4,622억원, 상업 11조 8,097억원, 공업 6조 8127억원, 농업 1조 8,391억원, 도로 464억원으로 나타났다(Table 7).

국내 21개 유역별 홍수 피해액 가치 산정을 평균구간 기준으로 산정한 결과, 주거 5조 5,393억원, 상업 11조 2,200억원, 공업 6조 8,117억원, 도로 465억원으로 나타났다. 주거 및 상업지역의 전체 가치 평가 결과가 침

Table 7. The results of Potential damage value assessment of Land cover types(Unit: billion won)

Flood Depth	Result of Residential damage value assessment (Billion won)									
	Residential		Commercial		Industrial		Agricultural		Road	
	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max
FD<0.5m	249	513	502	1,004	220	440	16	31	1	2
0.5m≤FD<1.0m	443	529	946	1,111	409	516	73	107	3	4
1.0m≤FD<2.0m	1,101	1,299	2,027	2,370	1,061	1,252	295	344	8	8
2.0m≤FD<5.0m	4,887	5,442	6,420	7,070	4,307	5,008	874	1,139	24	29
FD≥5.0m	783	768	1,914	1,914	816	816	582	576	10	10
Total	7,462	8,551	11,810	13,469	6,813	8,033	1,839	2,197	46	52

Table 8. The result of damage value assessment of 21 basin (Unit: billion won)

Basin		Residential	Commercial	Industrial	Road	Total
Han River	Han River	1,824	4,074	446	10	6,353
	Anseong Stream	185	502	100	2	789
	West of Han River	-	-	-	-	-
	East of Han River	-	-	-	-	-
Nakdong River	Nakdong River	2,332	4,881	5,358	22	12,593
	Hyeongsan River	-	-	-	-	-
	Taehwa River	-	-	-	-	-
	Hoeya·Suyeong	20	81	84	0	186
	East of Nakdong River	-	-	-	-	-
	South of Nakdong River	19	39	3	0	61
Geum River	Geum River	491	982	434	5	1,913
	Sapgyo Stream	146	135	52	1	334
	West of Geum River	-	-	-	-	-
	Mangyeong·Dongjin River	230	462	96	2	790
Seomjin River	Seomjin River	-	-	-	-	-
	Southern Seomjin River	-	7	-	-	7
Yeongsan River	Yeongsan River	259	0	237	4	500
	Tamjin River	30	50	1	0	81
	South of Yeongsan River	4	7	-	-	11
	West of Yeongsan River	-	-	-	-	0
Jeju Island			0	0	0	0
Total		5,539	11,220	6,812	47	23,617

수십 결과와 차이가 발생하는 원인은 대권역 경계 이외의 지역에 침수지역이 분포하고 있기 때문으로 판단된다. 잠재적 홍수 피해가 높게 나타난 유역은 21개 유역 기준 낙동강이 12조 5,930억원, 한강 6조 3,534으로 나타났다. 특히 낙동강 유역내의 공업지역은 잠재적 피해액이 5조 3,583억원으로 다른 유역에 비해 매우 높게 나타났다(Table 8).

농업지역 대상으로 경작 특성에 따라 논, 밭, 시설재

배지, 과수원, 기타 지역으로 구분하여 잠재적 피해 가치를 산정한 결과 전체 잠재적 피해액은 1조 8,400억원으로 산정되었다. 논이 1조 3,647억원, 밭 1,598억원, 시설재배지 2,698억원, 과수원 285억원, 기타 172억원이며, 유역별로 살펴보면 낙동강이 6,322억원으로 가장 높게 산정되었으며, 그 다음으로 금강 3,318억원, 만경·동진강 2,283억원 순으로 나타났다.

생태계 계정은 1년 단위로 집계 관리되므로 500년

Table 9. The result of damage value assessment for 21 basin (Unit: billion won)

Basin		Agricultural					Total
		Paddy	Field	Utility	Orchard	ETC	
Han River	Han River	102	25	13	2	1	144
	Anseong Stream	111	6	4	0	2	123
	West of Han River	-	-	-	-	-	-
	East of Han River	-	-	-	-	-	-
Nakdong River	Nakdong River	366	82	160	18	6	632
	Hyeongsan River	-	-	-	-	-	-
	Taehwa River	-	-	-	-	-	-
	Hoeya·Suyeong	-	-	-	-	-	-
	East of Nakdong River	-	-	-	-	-	-
	South of Nakdong River	1	2	0	0	0	3
Geum River	Geum River	238	24	63	3	4	332
	Sapgyo Stream	128	3	6	0	1	137
	West of Geum River	-	-	-	-	-	-
	Mangyeong·Dongjin River	213	7	6	1	1	228
Seomjin River	Seomjin River	-	-	-	-	-	-
	Southern Seomjin River	2	0	0			3
Yeongsan River	Yeongsan River	188	11	17	4	2	221
	Tamjin River	16	1	0	0	0	17
	South of Yeongsan River	-	-	-	-	-	-
	West of Yeongsan River	-	-	-	-	-	-
Jeju Island							
Total		1,365	160	270	29	17	1,840

빈도의 강우가 매년 발생하는 것을 고려할 경우 과잉 산정의 논리적 오류가 발생한다. 따라서 1년 안에 500년 빈도 강우가 발생할 확률값(1/500)을 전체 산정액 적용하여 최종적으로 유역 상류 생태계가 하류지역에 제공하는 홍수조절서비스 양을 산정한다. 결과적으로 발생 확률을 고려하지 않은 유역 생태계서비스의 잠재적 평가액은 25조 4,571억원 집계되었으며, 계정체계에서 1년 기준 생태계 가치 평가액은 약 509억원으로 나타났다.

## 2. 고찰

홍수는 전 세계적으로 가장 큰 영향을 미치는 자연 재해 중 하나로, 인명 피해와 건물, 산업, 거주지, 통신, 인프라, 농업 분야에 피해를 초래한다(Schanze et al. 2007). 자연 생태계는 표면수의 빠른 유출을 방지하고, 최대 방류량을 줄일 수 있어 홍수 재해 위험을 완화하는데 중요한 역할을 한다(Bayley 1995). 홍수조절서비

스 생태계 계정은 이러한 생태계의 홍수조절 능력을 평가하고 실제 사회·경제 분야에 어떻게 연결되고 기여하는가를 파악할 수 있는 체계이다.

홍수조절 생태계서비스에 대한 공급, 수요 그리고 이로부터 발생하는 흐름을 정량화하고 평가하는 것은 공간계획 및 홍수관리 체계에 있어 중요한 정보를 제공한다. 연구 수행 결과 국가 전체 5개 대권역 안에서 방재시설 없거나 작동하지 않고, 500년 빈도 홍수 발생 시 발생할 수 있는 잠재적 경제적 평가액은 25조 4,571억원으로 산정되었다. 1년 단위의 홍수 발생 확률을 고려할 경우 이는 약 509억원이다.

그러나 연구를 통해 산정된 홍수조절의 생태계서비스 가치 평가액은 다른 대체 수단의 도입을 위한 일방적 비교로 사용될 수 없다. 왜냐하면 홍수조절을 위한 방재시설의 기술적 투자 비용과 특정한 생태 자산의 가치는 경제적 특성상 그 변화 범위가 크기 때문이다(Haines-Young & Potschin 2009; TEEB 2010). 그럼에도

생태계를 화폐 가치로 표현하는 것은 경제적으로 생각하는 사람들의 행동방식 및 의사결정에 영향을 미칠 수 있으며, 정책 수립에 있어 강력한 요인으로 작용할 수 있기 때문이다. 그러나 동일 유사 생태계가 제공하는 동일 생태계서비스와는 직접 비교를 가능하게 해준다 (Emerton & Bos 2004). 예를 들어 동일한 특성을 가진 산림이 서로 다른 유역에 분포할 경우 두 산림의 홍수 조절서비스를 평가하여 우선 보전해야 할 산림을 선택할 수 있다.

이는 계정에서 국가 계정 또는 환경경제통합계정과 의 연동을 가능하게 해주는 중요한 요소이다. De Groot et al.(2012)는 생태계서비스의 금전적 단위 표현은 생태계의 인식을 높이고 정책 입안자에게 생태계와 생물다양성의 상대적 중요성을 전달하는 도구로 주장하였다.

본 연구에서는 회피비용법을 사용하여 21개 유역에 대한 홍수조절 생태계서비스의 경제적 가치 평가를 제시할 수 있었다. 그러나 이러한 결과가 제한적인 가정과 범위에서 이뤄져 생태계가 주는 혜택을 과소 평가할 수도 있다. 예를 들어 500년 빈도 홍수 뿐만 아니라 100년, 200년 빈도 등에서도 피해가 발생할 수 있으므로 이러한 가치를 1년 단위로 추가하여 종합할 필요가 있다. 반대로 기존의 제방 시설이나 댐, 호소, 습지 등이 이러한 피해를 방지해 주고 있기 때문에 그 부분에 대해서는 제외할 수 있는 방법론이 연구되어야 한다. 데이터의 활용 측면에서도 홍수조절생태계서비스 계정화를 위해서는 토지이용 정보와 홍수범람지도의 지속적인 업데이트를 통한 관리가 이뤄져야 할 것으로 판단된다. 피해 함숫값 및 최대 피해값 역시, 국내 특성에 맞는 개발되거나 보정하는 과정이 필요할 것으로 보인다.

#### IV. 결론

자연 및 생태 자산에 대한 중요성이 전 지구 및 국가적으로 확대되고 있다. 그러나 아직까지 자연 및 자산이 인간에게 주는 혜택이 경제 분야와 어떻게 연관되어 있어, 관리해야 하는지에 대해서는 많은 논의와 고민이 필요한 상황이다. 자연 기반 홍수조절 생태계서

비스 평가는 유역에서 생태계 수용능력, 수요, 흐름 간의 교차관계와 균형을 파악하게 함으로써 홍수 관리를 위한 공간계획에 있어 지식 기반의 의사결정을 지원하는데 효과적이다. 또한 홍수조절서비스에 대한 생태계 계정화는 생태계와 사회·경제와 연결할 수 있는 정량적이고 관리적 측면에서 이점을 가진다.

유역 하류에 위치하고 있는 여러 인위적 공간과 시설들은 상류 생태계로부터 직간접적으로 영향을 받고 있다. 이러한 공간적 관계를 설명하고, 관리하기 위해서는 생태계의 공급 능력과 이를 필요로 하는 수요, 그리고 두 관계에서 이뤄지는 흐름 즉 이용을 파악하는 것이 필요하다. 따라서 이러한 개념을 포함하는 홍수 조절서비스의 생태계 계정화는 인간활동 및 기후변화로 인한 생태계 관리를 지속가능하게 할 수 있는 중요한 체계이다. 그러나 국내에서는 아직까지 관련 연구 및 정책이 절대적으로 부족한 실정이다. 본 연구는 국내 활용 가능한 자료를 이용하여 홍수조절 생태계서비스를 계정화할 수 있는 방안을 검토하고 실제 이를 평가했다는 데 그 의의가 크다. 본 연구가 전국의 대권역을 중심의 국가하천을 대상으로 하고 있어 실제 세부적인 지역적 차원의 특성을 반영하지 못했다는 한계점이 있다. 따라서 지역적 특성을 반영한 홍수조절 서비스 평가 방법론에 대한 연구 또한 필요할 것으로 판단된다.

#### 사사

본 연구는 국립생태원 2024년 생태계서비스 평가 기반 정책 결정 지원 체계 수립(NIE-B-2024-03) 연구과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### References

- Barth NC, Doll P. 2016. Assessing the ecosystem service flood protection of a riparian forest by applying a cascade approach. *Ecosystem Services*. 21: 39-52.
- Bayley PB. 1995. Understanding large river: floodplain ecosystems. *BioScience* 45(3): 153-158.

- Burkhard B, Maes J. 2017. 6.2. Problematic ecosystem services. *Mapping Ecosystem Services* 273.
- Burkhard B, Petrosillo I, Costanza, R. 2010. Ecosystem services-Bridging ecology, economy and social sciences. *Ecological Complexity* 7(3): 257-259.
- De Groot R, Brander L, Van Der Ploeg S, Costanza R, Bernard F, Braat L, Christie M, Crossman N, Ghermandi A, Hein L, Hussain S, Kumar P, McVittie A, Portela R, Rodriguez LC, ten Brink P, van Beukering P. 2012. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services* 1(1): 50-61.
- De Groot RS, Alkemade R, Braat L, Hein L, Willemen L. 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity* 7(3): 260-272.
- Emerton L, Bos E. 2004. Value: Counting ecosystems as water infrastructure. IUCN.
- Haines-Young RH, Potschin MB. 2009. Methodologies for defining and assessing ecosystem services. Final Report. JNCC. Project Code C08-0170-0062, p. 69.
- Huizinga J, De Moel H, Szewczyk W. 2017. Global flood depth-damage functions: Methodology and the database with guidelines (No. JRC 105688). Joint Research Centre.
- Jeong SK, Ban YU, Lee TH. 2023. The Characteristics of Early-Stage Ecosystem Services Accounting in Europe Union Member States. *KIEAE Journal* 23: 79-84. [Korean Literature]
- Lee TH, Moon HJ, Cheon GS, Kim JI. 2023. Pilot Evaluation for the Introduction of Ecosystem Accounting for Flood Control. *Korean Society of Environmental Impact Assessment* 32(6): 488-502. [Korean Literature]
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water Synthesis. World Resources Institute, Washington, DC.
- Ministry of Construction and Transportation, Korea Water Resources Corporation. 2001. Guidelines for flood map production. [Korean Literature]
- Mori S, Pacetti T, Brandimarte L, Santolini R, Caporali E. 2021. A methodology for assessing spatio-temporal dynamics of flood regulating services. *Ecological Indicators* 129: 107963.
- Nedkov S, Burkhard B. 2012. Flood regulating ecosystem services-Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators* 21: 67-79.
- Schanze J, Zeman E, Marsalek J. 2007. Flood risk management: hazards, vulnerability and mitigation measures (Vol. 67). Springer Science & Business Media.
- Schulp CJE, Lautenbach S, Verburg PH. 2014. Quantifying and mapping ecosystem services: Demand and supply of pollination in the European Union. *Ecological Indicators* 36: 131-141.
- TEEB. 2010. The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB.
- Villamagna AM, Angermeier PL, Bennett EM. 2013. Capacity, pressure, demand, and flow: A conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. *Ecological Complexity* 15: 114-121.
- Wolff S, Schulp CJE, Verburg PH. 2015. Mapping ecosystem services demand: A review of current research and future perspectives. *Ecological Indicators* 55: 159-171.
- Wübbelmann T, Förster K, Bouwer LM, Dworczyk C, Bender S, Burkhard B. 2023. Urban flood regulating ecosystem services under climate change: how can Nature-based Solutions contribute?. *Frontiers in Water* 5: 1081850.