

Research Paper

## 홍수조절 생태계 계정 도입을 위한 전국 단위 시범 평가

이태호 · 문희진 · 천금성 · 김정인

국립생태원 생태계서비스팀

### Pilot Evaluation for the Introduction of Ecosystem Accounting for Flood Control

Tae-Ho Lee · Hee-Jin Moon · Gumsung Cheon · Jung-In Kim

Ecosystem Service team, National Institute of Ecology

**요약:** 생태계서비스 계정은 생태계 공급 기능과 수요, 그리고 그 사이에서 발생하는 실제 서비스 흐름을 측정해야 한다. 흐름을 측정하기 위해서는 공급과 수요 관계를 정의해야 하며, 복잡한 연결 관계를 객관화할 수 있는 방법론이 필요하다. 국내에서는 생태계서비스에 대한 연구가 다양하게 진행되어 왔으나, 생태계서비스 계정화에 관한 연구는 부족하다.

본 연구의 목적은 환경경제통합계정(SEEA)의 실험적 생태계계정(EEA)에서 연구된 EU 방법론을 적용하여 홍수조절 생태계서비스를 평가하고 이를 토대로 생태계 계정 도입 방안을 모색하는데 있다. 연구수행을 위해 생태계의 유출량 보유 잠재력, 홍수조절에 대한 사회·경제적 수요, 그리고 그 사이의 관계로부터 형성되는 실제 서비스 혜택 흐름을 공간 기반으로 모델링하고 정량화하였다.

홍수조절 생태계서비스 실제 흐름을 산정한 결과, 국내 전체 서비스량은 165,595ha로 산출되었으며 많은 부분이 농경지에 집중되고 있음을 확인할 수 있었다. 향후 국내 홍수조절 서비스 계정 정밀화 도입을 위해서는 토지피복도와 같은 핵심 공간자료가 지속해서 구축 관리되어야 하며, 국가, 지역, 유역 등 다양한 공간 범위에서 적용 가능한 입력자료 및 방법론에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

**주요어:** 유역, 범람지, 자연자본, 유출곡선지수 방법

**Abstract:** Ecosystem service accounting must measure ecosystem supply functions, demand, and the actual service flows that occur between them. In order to measure flows, supply and demand relationships must be defined, and a methodology that can objectify complex connections is needed. Although various studies on ecosystem services have been conducted in Korea, but researches on accounting for ecosystem services are not enough.

The purpose of this study is to evaluate flood control ecosystem services by applying the EU methodology studied in the Experimental Ecosystem Account (EEA) of System of Environmental

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

Co-Authors: Hee-Jin Moon, Tel: +82-41-950-5644, E-mail: hjmoon5239@nie.re.kr, ORCID: 0009-0004-3801-8174

Gumsung Cheon, Tel: +82-41-950-5681, E-mail: rmatjd1024@nie.re.kr, ORCID: 0009-0007-4567-5609

Jung-In Kim, Tel: +82-41-950-5457, E-mail: kji9105@nie.re.kr, ORCID: 0000-0003-4365-8446

Received: 3 November, 2023. Revised: 12 December, 2023. Accepted: 14 December, 2023.

Economy Account (SEEA) and explore ways to introduce ecosystem account.

To conduct the study, the ecosystem's runoff retention potential, social and economic demand for flood control, and actual service benefit flows formed from the relationships between them were modeled and quantified on a spatial basis. As a result of calculating the actual flow of flood control ecosystem services, the total domestic service amount was calculated to be 165,595 (ha), and it was confirmed that much of it was concentrated in agricultural land. In order to account for domestic flood control services in the future, key spatial data such as land cover maps must be continuously established and managed, and researches on input data and methodologies applicable to various spatial scopes such as national, regional, and unit watersheds are expected to be necessary.

Keywords : Watershed, Floodplain, Natural capital, Curve Number method

## I. 서론

생태계는 인간에게 직간접적으로 다양한 혜택과 편익을 제공한다. 이를 일반적으로 생태계서비스라 정의한다. 생태계가 제공하는 서비스의 양과 질은 생태계와 사회·경제 시스템 사이의 복잡한 상호 작용에 의해 차이가 있다(Vallecillo et al. 2020). Burkhard (2017)는 생태계서비스 평가를 위해 고려해야 할 요소를 생태계의 제고(Stock)를 나타내는 '공급 잠재력(Potential)', 사회가 요구하는 '수요(Demand)', 특정 장소와 시간에 따라 제공되거나 이용되는 '실제 흐름(Actual flow)'으로 구분하였다. 생태계 계정은 이러한 '공급 잠재력', '수요', '실제 흐름'에 대해 경제활동 및 분야에 연계하고 통계화하는 체계(Framework)이다. 생태계 계정은 생태계 규모(Extent), 상태(Condition), 물리 및 화폐적 생태계서비스 흐름(Flow or Use), 금전적 자연자산(Natural capital)으로 구성된다. 이러한 생태계 계정 정보는 정책 지원 및 토지이용계획 의사결정 시 유용한 정보를 제공한다(Schulp et al. 2014).

생태계의 규모와 상태 등은 생태계 본연이 가진 특성으로 그 자체를 평가하여 공급 잠재력을 측정하여 계정화 하지만, 생태계서비스 생태계 계정화를 위해서는 공급자와 수혜자를 포함하는 서비스 개념이 명확하게 확립되어야 한다. 단순히 생태계 특정 기능 측정과 평가가 아니라 실제 혜택과 편익을 받는 수요와 실제 흐름에 대한 정의 및 구분이 이뤄져야 한다(Fisher et al. 2009).

UN 통계위원회의 2021년 생태계 계정 채택에 따라 국가별로 생태계 계정 도입에 관심이 증가하고 있으며, 앞서 언급한 공급 잠재력과 수요 사이의 실제 흐름을 정량화하는 방법론에 대해 실험적 시도들이 다양하게 이뤄지고 있다. 이러한 논의와 시도들은 현재까지 지속해서 이뤄지고 있다(Sutherland et al. 2018).

생태계 계정은 경제 중심이 아니라 생태계를 시작점으로 공간 명시적인 특성을 갖는다. 따라서 생태계서비스의 공급 잠재력과 수요 사이의 실제 흐름을 파악하기 위해서는 공간적 관계와 특성을 파악해야 한다. 이러한 과정은 단순한 중첩 관계보다 복잡하다(Syrbe & Walz 2012). 생태계서비스 실제 흐름은 생태계 잠재력과 수요 사이의 공간 함수 관계이며, 서비스 항목과 지표들에 따라 차이가 있다. 일반적으로 공급과 수요가 동일 공간체계에서 통합되어 평가되지 만(Barbedo et al. 2014) 토양침식, 홍수조절서비스와 같은 일부 조절서비스는 실제 혜택이 주어지는 흐름을 파악하기 위해서는 새로운 공간 통합 체계가 요구되며, 이로 인해 평가의 복잡성이 발생한다. 국내는 아직까지 생태계 계정화 체계를 고려한 생태계서비스 연구가 거의 진행되지 않았다. 일부 홍수조절서비스에 대한 연구를 수행하였으나, 수요와 실제 흐름의 명확성과 계정화 가능성을 고려하지 않고 진행되었다. 즉 홍수조절에 있어 수문학적 특성을 고려한 공급, 수요, 실제 흐름을 공간적으로 통합하지 못했다(Lee et al. 2022; Jung et al. 2023).

홍수조절의 생태계 계정화를 위해서는 앞서 수행

되었던 방법론과 활용 가능한 입력자료가 계정체계 요구 원칙에 부합하는지를 검토해야 하며, 필요 시 추가적 방법론 개발이 필요하다. 생태계 계정의 실험적 방법론에서는 국가 및 지역에 해당 방법론이 적합한 지에 대한 실증적 연구의 필요성을 강조하고 있으나, 이에 대한 국내 경험 및 사례는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 여러 생태계서비스 가운데 홍수조절에 초점을 두고 있다. 최근 기후 변화로 인한 생태계의 위협과 이로 인해 자연재해가 증가하고 있으며, 홍수는 전 세계적으로 가장 큰 필요를 발생시키는 재해이다. 이러한 홍수에 대해 생태계는 생물리학적 과정을 통해 그 영향을 저감시키거나 완화시키는 역할을 한다. 일반적으로 생태계가 홍수조절을 제공할 수 있는 원리는 전체 유역에서 생태계의 물 저장 및 유출량 조절을 통해, 초기 홍수조절 또는 홍수를 예방하는 방식이다(Crossman et al, 2019). ‘홍수조절’은 다양한 생물리학적 과정을 통합하는 용어로 정의되며(Crossman et al, 2019; Vallecillo et al, 2020), 생태계의 생물물리학적 특성에 따른 홍수조절 과정과 이를 사회·경제적 시스템과의 연계하는 구조는 복잡하고 다양하다. 홍수조절에 대한 생태계서비스 계정화를 위해서는 이러한 관계성을 규정하고 생태계 홍수조절로 인해 실제 혜택을 받는 크기와 대상을 기록하고 변화를 관찰할 수 있도록 해야 한다. 홍수조절 생태계 계정은 시간과 공간 명시적인 특성을 고려할 때 새로운 방법론에 대한 개발보다도 기존 방법론에 대한 적용성 연구가 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 유럽에서 추진한 홍수조절 생태계서비스의 실험적 생태계 계정화 방법론을 시점 적용하고자 한다. 이 방법론은 1) 유출수를 줄이기 위한 ES 잠재

적 기능 측정(SPA; Service Providing Areas), 2) 홍수조절 혜택을 받는 사회·경제적 수요 정의(SDA; Service Demand Areas), 3) 두 관계에서 형성되는 실제 서비스 흐름 측정(Actual flow) 및 계정 테이블 작성 목표로 한다. 이를 위해 공간 기반의 홍수조절 생태계서비스를 정의하고 부분적인 모델링을 통해 경제활동과 연결할 수 있는 실제 흐름의 결과값을 정량적으로 산출한다. 최종적으로 이러한 정량적 흐름을 물리 화폐 단위로 환산하여 경제활동과의 관계성을 기록하고 설명한다.

따라서 본 연구의 목적은 유럽에서 진행된 환경경제통합계정의 실험적 생태계 계정에서 사용한 홍수조절 생태계서비스 평가 방법론을 부분적으로 국내에 시범 적용 및 시사점을 도출하는데 있다.

## II. 본론

### 1. 연구 방법 및 절차

생태계 계정 체계에서 생태계 홍수조절 혜택을 평가하고 지도화하기 위해서는 생태계 잠재 기능(제공 영역)과 수요 영역 사이의 공간적 해석과 통합이 필요하다. 본 연구에서는 제공 잠재력을 ‘서비스 제공 영역’으로 수요는 ‘수요 영역’으로 정의한다. 수요 영역은 유역에서의 물의 흐름에 영향을 직접적으로 받는 영역이며, 그 크기는 실제 흐름으로 파악한다. 생태계서비스 흐름이 발생할 경우 최종적으로 ‘서비스 혜택량 또는 혜택 영역’으로 볼 수 있다. 최종적으로 이를 정량화하는 것이 이 방법론의 목적이다. 서비스 제공 영역과 수요 영역 사이에는 생태학적, 사회·경제적 과정에 따라 차이를 보인다. 기본적으로 생태계

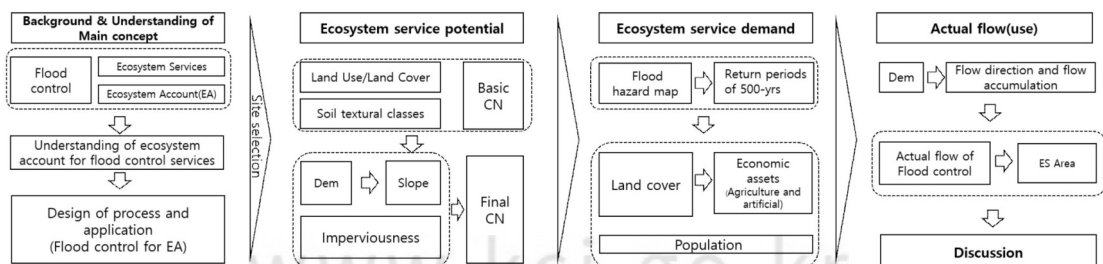


Figure 1. The procedure of this study

에 의한 홍수조절은 유역 단위에서의 지형 인자에 따른 물의 흐름에 의해 결정된다. 본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 소유역 단위의 하천범람 홍수만을 평가의 대상으로 한다.

본 연구의 수행 절차는 1) '연구의 대상지 선정' 2) '홍수조절 제공 생태계 영역 산정', 3) '홍수범람예상지 수요 영역', 4) '서비스 실제 흐름 정량화' 네 단계로 진행된다. Figure 1은 세부 연구 과정을 보여준다. 생태계의 잠재적 제공 능력에 대한 평가는 유역에서의 토지피복과 토양특성에 따른 물저장 기능을 파악할 수 있는 NRCS-CN 방법론을 이용한다. 이 방법론에서 사용하는 유출곡선(Curve Number) 값은 1ha 단위격자에 할당되며, 유역 경사 특성을 반영하며 최종적으로 이를 보정하여 사용한다. 수요 지역은 실험적 방법론에서 제시한 것과 동일하게 500년 빈도 강우 시 범람하는 경제자산(경작지와 인공지)을 수요지역 정의하고 공간적으로 이를 구분한다. 실제 흐름 나타내는 서비스 혜택 수용 영역 산정은 잠재적 홍수조절 제공지(유역 상류), 범람지의 물흐름을 고려한 상류지역의 면적 계수를 산정하여 평가한다.

**2. 대상지 선정 및 현황**

본 연구에서는 전 국토를 대상으로 하고 있으며, 소유역 단위 평가를 위해 단위유역 공간 정보를 활용하였다. 단위유역은 843개로 면적은 총 109,454.6km<sup>2</sup>이다(Table 1). 유역의 평균 면적은 129.8km<sup>2</sup>이며 면적이 가장 넓은 유역은 '임진강 상류'이며 573.79km<sup>2</sup>로 조사되었고, 가장 작은 면적은 '낙동강 진동수위표'로 7.5km<sup>2</sup>로 나타났다. 유역 가운데 접경지역에 위치한 유역은 37개이며, 국가하천 202개, 지방하천 578개로 조사되었다. 본 연구에서는 접경지역과 같이 정밀토양도 등 입력자료가 구축되지 않은 지역은 연구 대상지에서 제외하였다. 제외된 대부분 대상지는 접경지역이거나 도서 지역으로 나타났다. 공간입력자료가 구축되지 않은 62개의 유역을 제외한 총 781개를 최종 분석 대상으로 선정하였다. 전체 843개의 유역 분포와 면적 현황은 아래와 같다(Figure 2, Table 1).

Table 1. The status of study site  
The status of standard basin (unit: km<sup>2</sup>)

Count	Sum	Std.Dev.	Mean	Max.	Min.
843	109,454.6	70.9	129.8	573.8	7.5

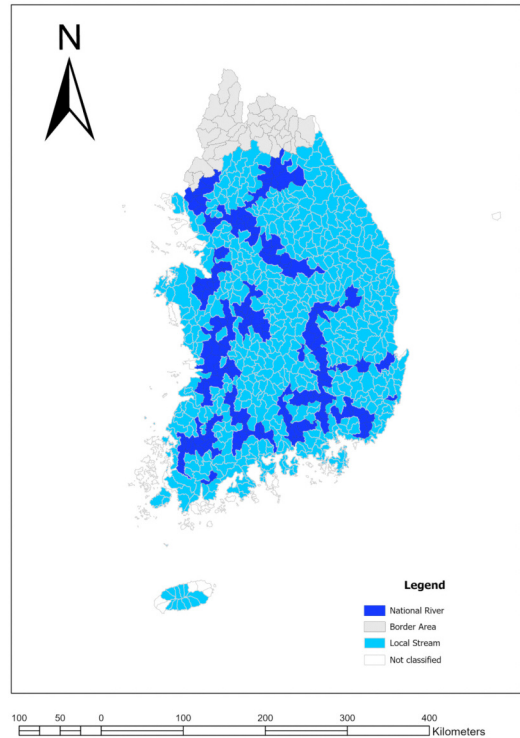


Figure 2. Area of interest

**3. 연구방법**

**1) 서비스 제공 영역**

생태계가 작용하는 홍수조절의 기본 원리는 숲, 관목지대, 초원, 습지 등의 다양한 생태계가 토양과 대수층에 물을 유지하고, 물의 흐름을 늦추며 이를 통해 지표수의 빠른 하류 유출을 방지하여 하류지역에 위치한 경제적 가치를 가진 인공지 시설과 농지에 대한 홍수 피해를 감소시키는 방식이다. 유역에서의 유출량을 산정 방법에는 침투지수법을 이용하는  $\Phi$ -지수법, W-지수법, 유출곡선지수(Curve Number)를 이용한 NRCS 방법론이 있다(Moon et al. 2014). 이 가운데 생태계의 홍수조절서비스 공급 및 능력을 정량적으로 측정하기 위해 유출곡선지수(NRCS-CN, Natural Resources Conservation Services Curve-

Number) 방법론을 이용한다. 이 방법론은 1972년 미국농업국에 의해 개발하였으며, 유출량 산정에 있어 생태계를 반영할 수 있는 토지피복 및 토양특성 조합이 유출결과의 주요 결정인자이다. 본 연구에서는 토지피복과 토양의 수문학적 특성에 의해 결정되는 CN값을 통해 홍수 시 유역 상류 생태계의 물저장 저장 능력을 평가하는 지수로 활용한다. CN값은 무차원 지수로서 단위를 갖지 않고 생태계의 홍수조절에 대한 잠재적 기능에 대한 상대적 수치를 나타낸다. CN값은 본래 미국에서 평탄한 지역을 대상으로 개발되었기 때문에 이를 국내에 적용하기 위해서는 보정이 필요하다. 강우 시 유출 특성은 토양 상태 및 토지 경사에 영향을 받는다. 토지 상태는 기존의 토양이 습한 상태에 따른 것으로 구분하며, 토지 경사는 유역의 경사 특성을 반영한다. Cho et al. (2004) 와 Kim et al. (2007)은 유역의 경사를 이용하여 CN값을 보정하여 이를 통해 유효수량 산정한 결과 정확성이 높다는 것을 확인하였다. 이를 선행토양함수조건(AMC, Antecedent Soil Moisture Condition)에서의 가중치 평균을 적용하거나 유역 경사도 특성을 반영한 보정을 하기도 한다. 물의 흐름은 경사에 따라 그 속도가 달라지며 경사가 급해 흐름이 빨라지면 그만큼 침투하는 양도 줄어들게 된다. 본 연구에서는 CN값의 경사도 보정을 위한 Huang et al. (2006)이 제안한 식을 이용하여 보정한다. Equation 2에서 K는 경사 보정 계수이며,  $\alpha$ 는 경사(%)이다.

$$CN_{II} = CN_{II} \times K \quad (1)$$

$$K = \frac{322.76 + 15.63 \times \alpha}{\alpha + 323.52} \quad (2)$$

유역의 평균 경사도 산정은 수치표고모형(DEM, Digital Elevation Model) Arc Hydro 모델을 이용하여 전체 대상 유역 DEM 자료를 래스터로 변환하여 산정한다. 최종적으로 CN 점수가 높은 값일 경우 강우 시 물보유 기능이 낮은 것으로 평가된다. 홍수 조절 잠재적 제공 능력을 CN값을 통해 평가함으로써 강우량에 따른 실제 홍수 발생과 관계없이 현재, 과거 미래에 대해 1년 단위의 생태계 홍수조절 능력을 측정할 수 있다.

## 2) 수요 영역

생태계서비스 수요의 정의에 있어 Burkhard et al. (2012)는 “생태계 서비스가 실제로 제공되는 곳을 고려하지 않고 주어진 기간 동안 특정 지역에서 현재 소비되거나 사용되는 모든 생태계 상품 및 서비스의 합계”로 생태계서비스 수요로 정의하였다. 이 밖에도 사회가 요구하거나 원하는 서비스양(Villamagna et al. 2013), 서비스를 얻으려는 이해관계자의 의지의 실제 표현(Geijzendorffer et al. 2015) 등으로 정의하기도 한다. 이는 문화적으로 의존적인 욕구 및 요구, 대안 가용성 또는 이러한 요구를 충족하는 수단과 같은 여러 요소에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 홍수조절을 위한 서비스 수요 영역은 유역 하류의 범람원에 위치한 경제적 자산으로 정의한다. 경제적 자산을 지도화하기 위해 환경부 중분류 토지피복도를 활용하였으며, 경제자산 영역은 토지피복 분류상에서 시가화·건조지역(100)과 농업지역(200)으로 설정하였다. 수요 영역의 경계는 홍수위험지도(서비스 제공 기관 및 관련 정보 수록)에서 제공하고 있는 500년 빈도 강우 시 침수지로 예상되는 영역을 설정하였다(Vallecillo et al. 2020).

## 3) 홍수조절 서비스 흐름 산정

홍수조절에서 생태계서비스의 이용 즉 실제 서비스 흐름은 범람원이 위치하는 유역에서의 생태계서비스 공급 영역(Service Provision Area)과 수요 영역(Service Demand Area)의 공간적 관계를 고려한다. 관계에 있어 중요한 요소는 유역 경사에 의존하는 물 흐름과 방향성이다. 이 흐름을 토대로 수요지역과 유역의 상류지역을 구분하게 되며, 상류지역의 서비스 제공 능력 또는 기능은 하류 범람지에 직접적으로 영향을 끼치게 된다. 즉 수요 혜택 영역의 결정은 상류지역의 물 보유 기능 생태계 면적과 그러지 않는 면적 비율에 따른다. 최종 서비스 혜택 영역에 대한 산정 방법은 Equation 3과 같다. 예를 들어 수요지역 물 흐름 축적량에 영향을 미치는 상류지역 서비스 비율이 1이면 전체 상류지역의 모든 면적이 홍수조절 기능을 가진 면적으로 덮여 있음을 의미한다. 반대로 0 일 경우에는 상류지역에 홍수조절서비스 기능과 수요

혜택 영역이 없음을 의미한다.

$$Actual\ ES\ flow(ha) = \frac{\sum [Ratio\ SPA_{up} \times SDA_{Grid\ cell\ size}(ha)]}{(3)}$$

홍수조절 서비스 실제 흐름은 주어진 연도의 실제 홍수조절 혜택을 받는 수요지역 면적(ha)으로 표현된다. 홍수조절의 실제 생태계서비스 흐름의 지도화를 위해 소유역 수준에서 합계를 계산하여 잠재적 공급의 격자 셀의 실제 ES 흐름을 집계한다. 이러한 산정 방식은 실제 흐름에 영향을 미치는 잠재적 변화를 파악할 수 있게 해주는 장점이 있다. 예를 들어 유역 상류의 서비스 제공 능력에 영향을 미치는 불투수성 증가, 산림벌채 등이 발생할 경우 그 다음 회계연도에 이를 반영할 수 있게 해주며, 토지이용 계획 시 공간적으로 생태계 물저장 기능의 상실을 방지할 수 있는 근거를 제시할 수 있게 해준다. 마찬가지로 범람지의 경제 자산 지역의 면적이 증가할 경우에도 서비스 혜택 영역의 값이 증가한다. 이러한 공간 기반의 정량적 결과들은 향후 홍수 침수에 따른 경제적 손실과 관련하여 화폐적 평가도 가능할 수 있게 한다.

#### 4) 입력 자료 구축

국가 공간정보 및 문헌 등을 이용하여 잠재적 서비스 제공 영역과 수요 영역 그리고 실제 서비스 흐름 산정을 위한 입력자료를 구축하였다. 서비스 제공 영역은 토양의 수문학 특성 자료는 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복도와 농촌진흥청의 정밀 토양도 자료를 활용하였으며, 수문학적 분류는 Jung (2007) 기준을 따랐다. Table 2는 모델링 및 평가 산정을 위해 이용된 주요 입력자료의 목록과 파일 형식, 참조 문서를 나타내고 있다.

수문학적 토양특성과 중분류 토지피복의 조합에 따른 CN값은 국내 여건에 맞게 개량된 환경부 홍수량산정 표준지침(2019)에서 자료를 활용하였다 (Table 3). 단위 유역 경사에 따른 CN값의 보정을 위해 전국 DEM 자료를 활용하였으며, 데이터 처리는 ESRI사의 ArcGIS Hydro 도구를 활용하였다. 공간해상도 100m×100m (1ha) 단위로 기본 설정하였으며, 관련 입력자료들은 동일 해상도로 리샘플링하여 활용하였다. CN값의 적용은 선형토양합수조건 중간 상태

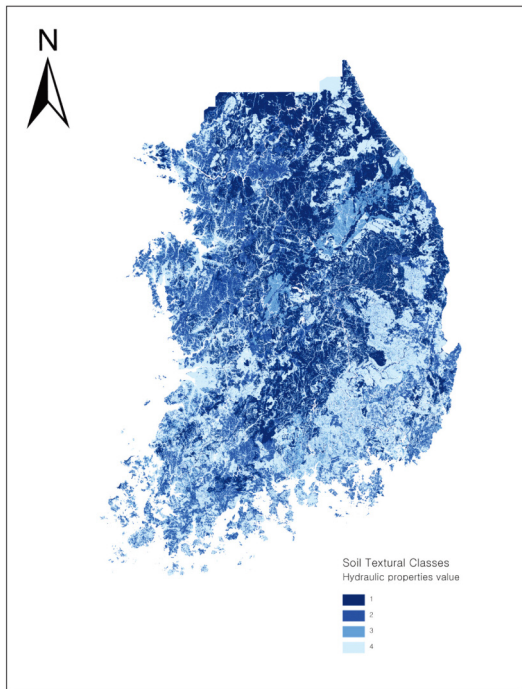


Figure 3. Soil textural classes map

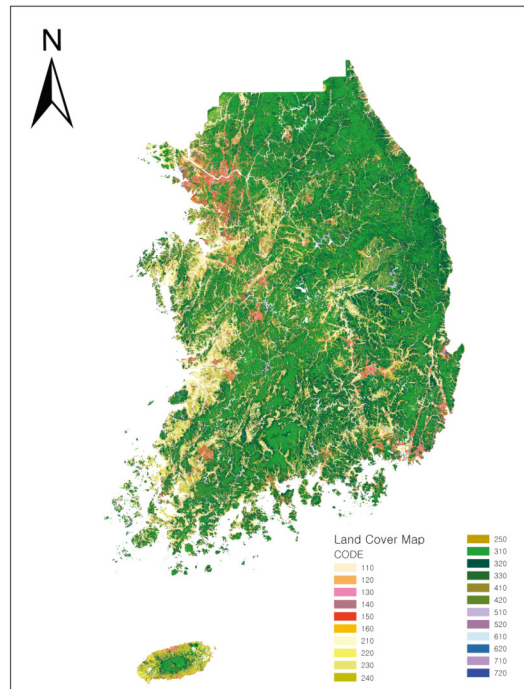


Figure 4. Land cover map

Table 2. Input data of SPA, SDA, Actual flow of ecosystem services

Classification	Input Data	Format	Reference
Service Provision Area	Land Use/Land Cover map	Vector	Land cover map (Ministry of Environment)
	Soil Textural Classes	Vector	Detailed Soil Maps (RDA) (Jung et al. 2007)
	Watershed map	Vector	Watersheds (WAMIS)
	CN Number	Table	Standard Guidelines for Flood Estimation (Ministry of Environment, 2019)
	Digital elevation map (DEM)	Raster	National Geographic Information Institute
Service Demand Area	Built Infrastructure	Raster	Land cover map (Ministry of Environment)
Actual Flow	Provision map		Raster, CSV
	Demand map		Raster, CSV

Table 3. Curve Numbers according to Land cover and Soil type

Land Cover description		LC CODE	Curve Numbers of Soil textural classes			
			A	B	C	D
Urban districts	Residential area	110	77	85	90	92
	Industrial area	120	81	88	91	93
	Commercial area	130	89	92	94	95
	Cultural, Recreation, Sport	140	49	69	79	84
	Transport	150	83	89	92	93
	Public facilities	160	61	75	83	87
Agricultural lands	Paddy field	210	79	79	79	79
	Row crop	220	63	84	82	85
	Facilities for cultivation	230	76	85	89	91
	Orchard	240	70	79	84	88
	The rest for cultivation	250	68	79	86	89
Forest	Broad-leaved forest	310	55	72	82	85
	Coniferous forest	320	55	72	82	85
	Mixed forest	330	55	72	82	85
Grass	Natural	410	30	58	71	78
	Artificial	430	49	69	79	84
Wetland	Inland	510	100	100	100	100
	Coastal	520	100	100	100	100
Bare land	Natural	610	77	86	91	94
	Artificial	620	77	86	91	94
Water bodies	Fresh water	710	100	100	100	100
	Ocean	720	100	100	100	100

인 CNII를 기준으로 적용하였다. 지침에서는 침엽, 활엽, 혼합림이 동일하게 적용하였으며, 논, 논외 토양군의 특성과 상관없이 관련 연구를 통해 79를 동일하게 적용한다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 1) 주요 결과

생태계가 물을 보유하여 유출수를 줄이는 기여는 식생이나 토지피복 유형, 토양의 수리적 특성, 지형 경사에 따라 크게 달라진다. CN 방법을 국내에 경사

보정을 하여 각 유역별 홍수조절 서비스 제공 능력을 평가하였다. CN 점수의 범위는 0에서 100까지이며 값이 높을수록 유출량이 많다는 것을 의미한다. 경사 보정 전 일차적으로 CN값을 전국에 할당한 결과 평균 약 73.35로 나타났으며 표준편차는 약 13.08로 나타났다. Figure 5에서 CN값의 분포 현황을 보여주고 있다.

경사 보정을 위해 유역별 평균 경사도 활용했으며 Figure 7은 평균 경사값 이용하여 유역별 CN 가중치

값을 산정한 결과이다. 전국 분포 지도를 보면 북동 쪽이 높은 경사를 보여주고 있으며, 이는 생태계의 물 저장 기능의 감소 폭이 큰 것을 의미한다. 가중치에 따른 CN 값의 변화폭은 +2.0~2.7%인 것으로 나타났다.

산정된 가중치 값을 유역별로 적용하여 CN을 보정한 결과는 Figure 8과 같다. 평균값은 약 74.24, 표준편차는 약 13.19로 나타났으며, CN값은 보정 전 약 73.35에 비해 0.89 높아진 것으로 나타났다.

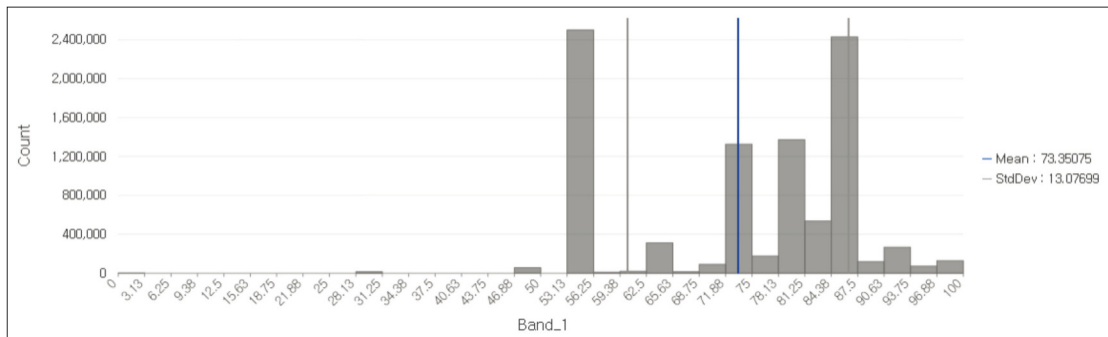


Figure 5. Histogram of CN values before adjustment

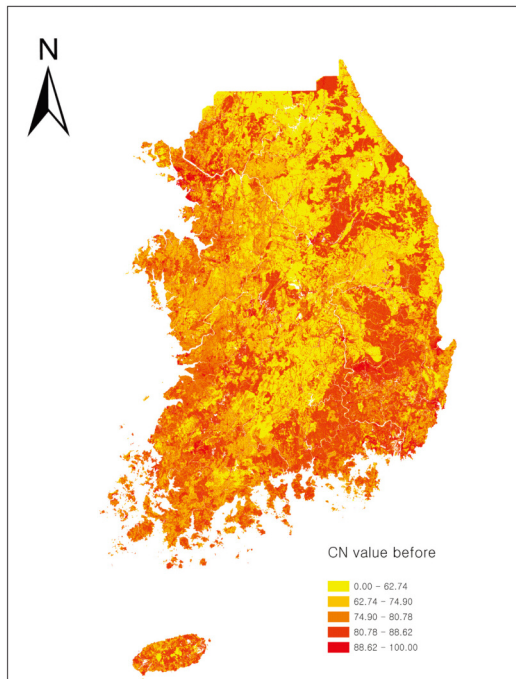


Figure 6. Distribution of CN values before adjustment

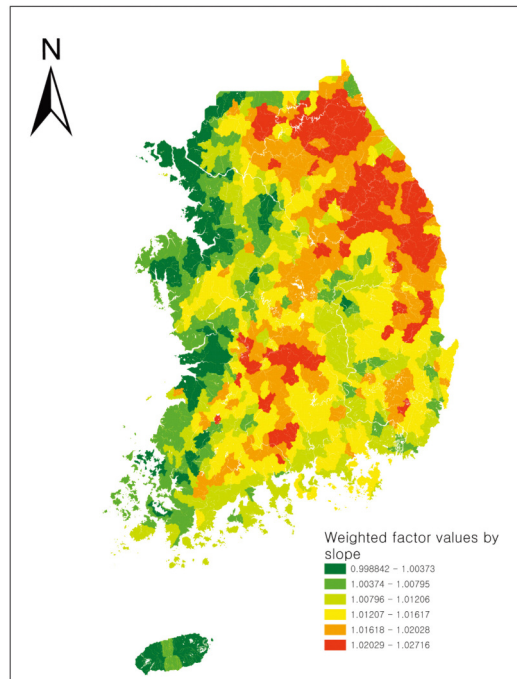


Figure 7. Weighted values by mean slope of watershed

수요 영역은 범람이 예상되는 유역 하류의 경제적 자산으로 정의한다. 홍수범람지도는 극한강우조건과 제방의 월류 및 붕괴 등 극한상황에 따른 홍수 발생 시 예상되는 침수범위와 침수깊이를 나타내는 지도이다. 본 연구에서는 유럽과 마찬가지로 국가하천 500년 강우 빈도에 따른 범람예상지를 수요 지역으로 설정하였다. 경제자산 영역의 구분은 환경부 토지피복도 분류기준을 이용하여 농경지와 시가화·건조지역으로 구분하였다. 수요 영역에 포함되는 단위 유역은 277

개이며, 전체 면적은 168,924ha로 나타났다.

대상 유역 가운데 가장 넓은 유역의 면적은 7,004 ha로 나타났으며, 수요 영역의 토지피복 분포 현황을 살펴보면 논이 103,076ha로 가장 넓은 면적을 차지하고 있다. 시가화·건조지역 가운데 교통시설이 19,535 ha로 비교적 넓은 면적이 차지하고 있었다. 주거, 공업, 상업지역은 각 3,702ha, 2,489ha, 3,450ha로 서로 유사한 값을 보여주었다. 수요 영역으로 정의된 유역의 토지이용 현황은 Table 4와 같다.

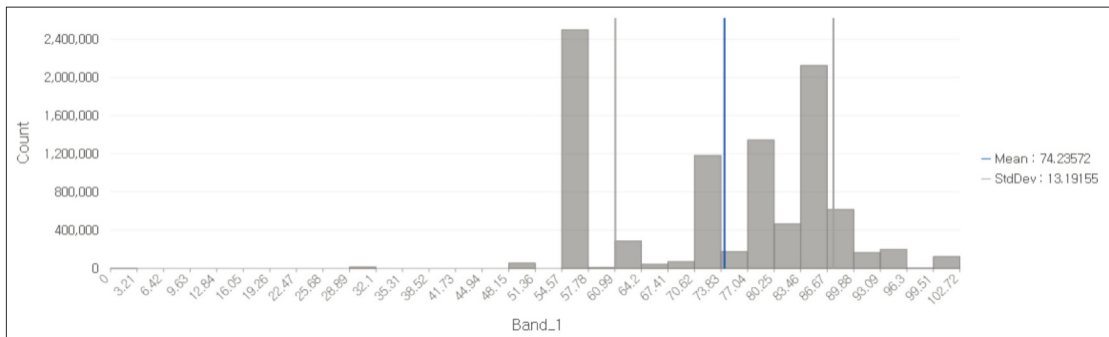


Figure 8. Histogram of CN values before adjustment

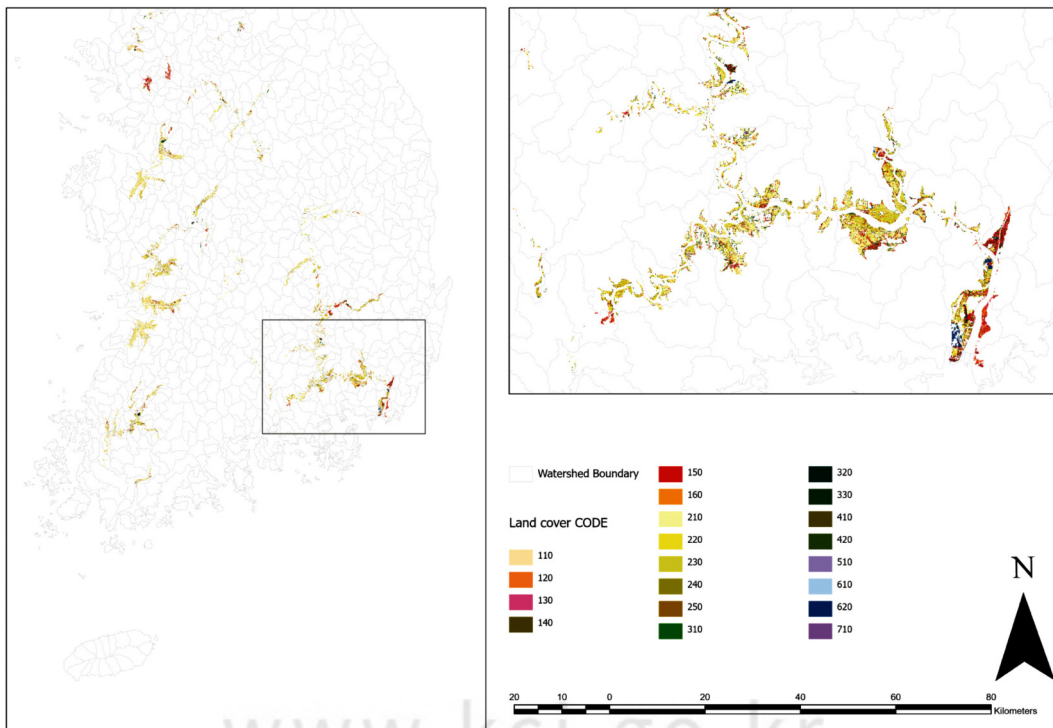


Figure 9. Demand area of Flood regulation services

Table 4. The status of demand areas

Land cover types		Area	
		ha	%
Artificial areas	Residential	3,702	2.3
	Industrial	2,489	1.5
	Commercial	3,450	2.0
	Cultural Sport Recreation	278	0.2
	Transport	19,535	11.5
	Public facilities	1,738	1.2
Agricultural lands	Paddy field	103,076	60.7
	Row crop	13,119	7.8
	Facilities for cultivation	17,506	10.4
	Pasture	2,657	1.5
	The rest for cultivation	1,509	0.9
Demand area		169,059	100.0

생태계에 의한 실제 홍수조절 흐름 산정을 위해 범람지 수요 면적에 대해 유역 상류 지역에 서비스 제공 영역의 비율을 계산하였다. 홍수조절의 실제 생태계 서비스의 흐름 지도는 특정 연도의 유역 상류 생태계

에 의해 보호되는 수요 영역(ha)으로 표현된다. 각 유역별 상류 지역의 서비스 기능 비율 값을 산정한 결과 평균값은 0.9851로 분석되었으며, 최솟값은 0.9250, 최댓값은 0.9976로 나타났다(Figure 10).

앞서 언급하였듯이 이는 상류지역에서의 잠재적 홍수조절 서비스 제공 면적 비율을 나타낸 것으로 값이 높을수록 상류지역의 서비스 제공 영역 면적이 높은 것을 나타낸다. Figure 11은 각 수요 유역별 상류 지역 서비스 제공 면적비 분포 현황을 보여준다.

홍수조절 제공 영역과 수요 관계를 통해 측정된 홍수조절 서비스의 실제 흐름의 결과를 지도화한 결과는 Figure 12와 같다. 총 277개의 유역에서 서비스 혜택이 있는 것으로 분석되었으며, 전체 서비스 흐름 또는 이용이 발생하는 면적은 약 165,595ha로 집계되었다.

소유역 가운데 가장 높은 서비스 흐름이 발생한 곳의 면적은 약 6,934ha으로 나타났다. 100ha 이하의 값을 가진 유역은 85개 유역으로 나타났다. 그 가운데 20개 유역은 10ha 이하의 작은 면적이다. 홍수조절 서비스의 실제 흐름이 높게 나타난 유역의 경제자

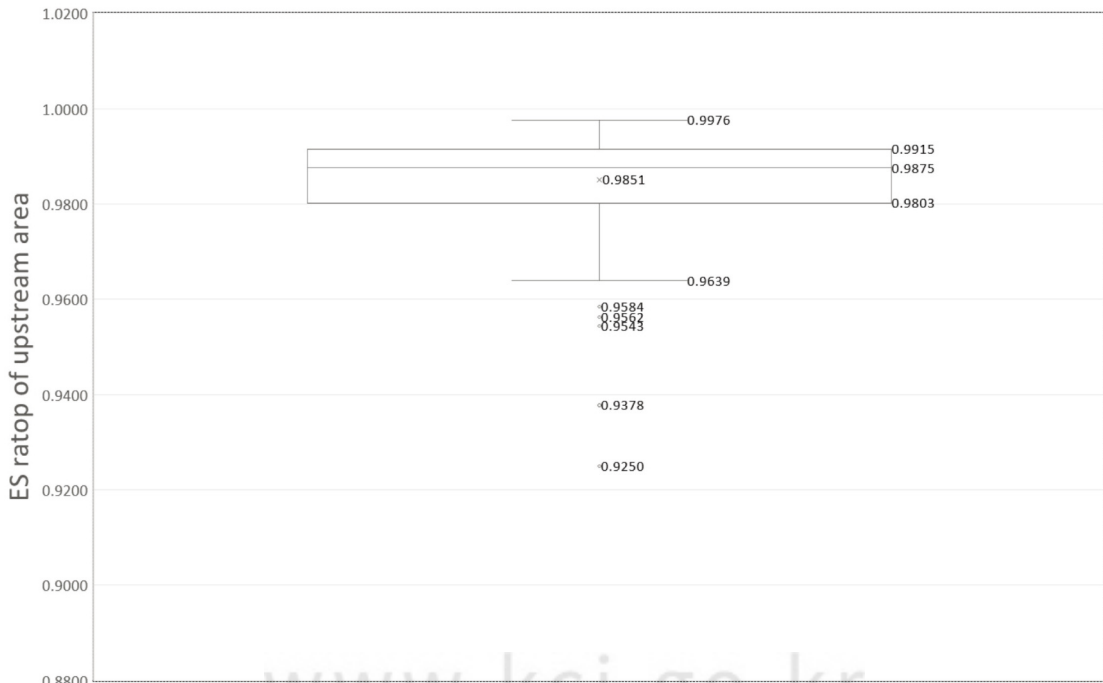


Figure 10. Box plot of Actual flow ratio

Table 5. The results of high ES actual flow and land cover types (Unit: ha)

Rank		1	2	3	4	5	6	7	
Name of watershed		Standard basin	Dongji stage gauge	Mankyong River middle stream	Miryang River confluence	Gobu down stream	Wonpyeong stream	Sapgyoseawall	Dongjin river down stream
Economic assets	Artificial surfaces	Residential	55	74	103	22	21	57	26
		Industrial	9	10	38	3	3	3	0
		Commercial	104	67	38	7	7	9	3
		Cultural Sport Recreation	1	4	1	0	0	0	0
		Transport	454	453	399	197	202	205	162
	Public facilities	62	76	22	40	97	44	53	
	Agricultural lands	Paddy field	5,937	3,829	1,831	4,305	4,222	3,910	3,647
		Row crop	185	487	370	97	85	72	46
		Facilities for cultivation	123	396	1710	20	28	27	38
		Pasture	48	36	201	0	1	0	0
The rest for cultivation		26	34	19	19	19	10	35	
Total Demand area		7,004	5,466	4,732	4,710	4,685	4,337	4,010	
Actual Flow of ES		6,934	5,269	4,566	4,564	4,562	4,267	3,900	

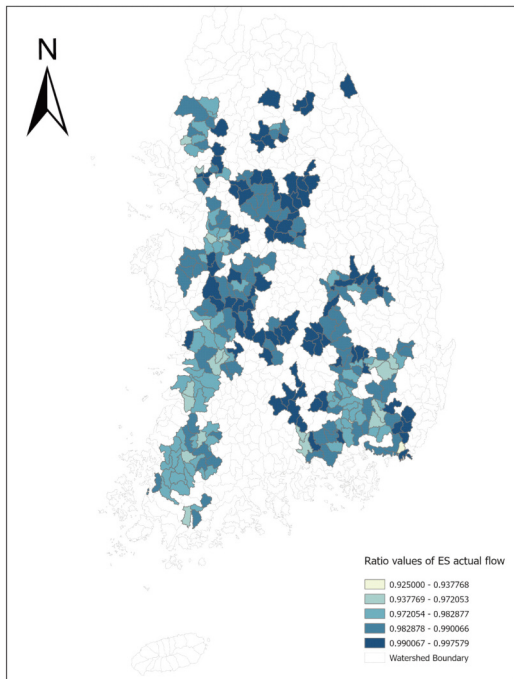


Figure 11. Map of ratio values of ES actual flow

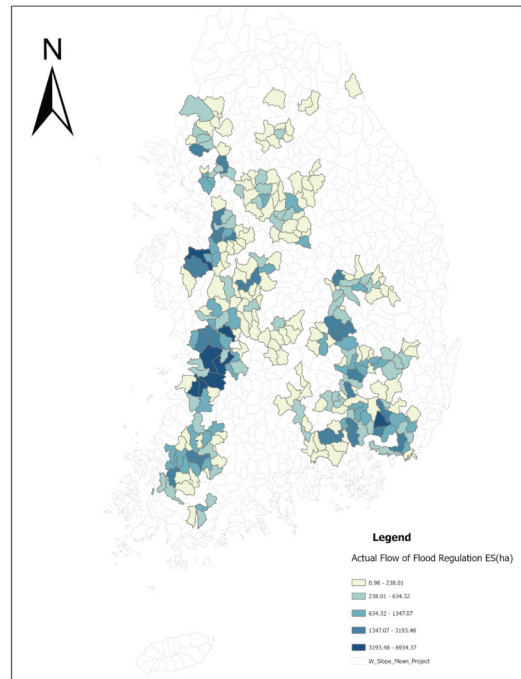


Figure 12. Map of Actual flow of Flood regulation ES

Table 6. The results of actual flow in urbanized areas (Unit: ha)

Rank		1	2	3	4	
Name of watershed		Jungnang down stream	Anyang down stream	Anyang stream	Yongsan stream	
Economic assets	Artificial surfaces	Residential	402	201	165	71
		Industrial	12	8	38	45
		Commercial	285	187	169	141
		Cultural Sport Recreation	19	14	34	14
		Transport	679	615	672	715
		Public facilities	79	34	30	25
	Agricultural lands	Paddy field	0	0	10	38
		Row crop	1	0	39	24
		Facilities for cultivation	1	0	20	17
		Pasture	0	0	0	0
The rest for cultivation		0	0	0	1	
Demand area		1,478	1,059	1,177	1,091	
Actual Flow of ES		1,467	1,050	1,160	1,082	

산의 토지피복 특성을 살펴보면 농경지가 차지하는 면적 비율이 높은 것으로 확인됐다. 가장 서비스 혜택 영역이 높게 나타난 동지수위표 유역의 토지피복 특성을 보면 논경작지가 약 85%를 차지하는 것으로 나타났으며, 만경강 중류 역시 70%가 농경지로 구성되어 있다. Table 5에서 볼 수 있듯이 서비스 혜택 영역이 넓은 상위 7개의 유역에서의 토지피복에서 농경지 구성비가 높은 것으로 나타났다.

상대적으로 서비스 수요 지역의 토지피복 구성이 인공피복인 유역 현황을 살펴보았다. 인공피복은 중분류상 주거, 상업, 공업 등의 토지이용 및 피복으로 구성되어 있으며, 홍수조절로 인해 피해가 농경지에 비해 높게 나타난다. 인공화된 토지피복 비율이 50% 이상인 서비스 혜택 유역은 38개로 분석되었다. 이 가운데 약 55%인 21개 유역은 90% 이상이 인공피복으로 구성되어 있다. Table 6에서 실제 서비스 흐름이 1,000ha 이상 발생하는 대상 유역 가운데 하천 하류부 수요 지역의 인공피복 비중이 95% 이상인 4곳의 대표적인 유역 현황을 보여준다. 중랑천은 대상 유역 가운데 1,467ha 서비스 흐름을 보여주고 있으며, 교통, 주거, 상업 비중이 높은 것으로 나타났다. 그 밖에 안양천과 안양천 하류 및 양산천 역시 교통지역의 면적비가 상대적으로 높게 나타났으며, 서비스 흐름

은 약 1,000ha 정도인 것으로 분석되었다.

## 2) 적용 한계 및 시사점

생태계가 주는 홍수조절서비스를 평가하기 위해 EU에서 검토된 실험적 생태계 계정화 방법론을 국내 전국 단위로 적용해 보았다. 홍수조절서비스에 대한 평가는 일반적으로 범람지 면적, 홍수빈도 등 단편적인 지표에서의 평가가 이뤄져 왔으나 이 방법론은 홍수조절 과정의 다양한 생물리적 특성과 공급과 수요 사이 실제 서비스 흐름을 측정하는 방식이다. 생태계 계정화 목적을 위한 이 방법론은 강우에 따른 잠재적 유출수의 양을 산정하지 않고, 유역 상류지역의 잠재적 유출 보유 기능을 평가하여 지표로 활용한다. 이 과정에서 연속적인 공간정보를 면적비율 단위로 단순화시키는 문제가 제기되기도 하며, 토양과 피복에 따른 생태계 홍수조절 기능 차이를 단순하게 유무 관계로 파악하여 정량화 한다는 문제점도 있다. 또한 상류와 하류 범람지 지역을 구분하고 하류지의 각 픽셀에 영향을 미치는 물의 흐름과 수문학적 관계를 토대로 실제 흐름을 구체적으로 파악할 경우 많은 시간과 비용이 발생할 수 있다. 이러한 한계에도 불구하고 소유역이라는 공간단위에서 생태계서비스 제공 영역과 수요 즉 혜택 영역을 결합한 공간 평가는 생태계서비

스 전달 과정에서의 실제 서비스 흐름의 역할에 대한 통찰력과 정량적 정보를 제공할 수 있다(Serna-Chavez et al., 2014). 최종적으로 소유역 단위의 무차원 지표(잠재적 유출 보유)에서 헥타르로 표현하는 물리적 단위로 생태계서비스 혜택 흐름을 전환하고 정량화하는 것은 계정화 측면에서 선호되는 방식이다(Syrbe & Walz 2012).

국내 적용 과정을 통한 주요 시사점과 개선 방안은 다음과 같다. 첫째 잠재적 서비스 제공 영역에 대한 평가에 있어 CN값은 중요한 요소이므로 환경부 지침에 대해 국내 여건과 실정을 고려하여 지속해서 고도화되어야 한다. 아울러 CN값의 차이에 따른 잠재적 서비스 제공 영역이 평가될 경우, 홍수조절을 위한 유역 상류의 토지이용 정책 운용시 보다 합리적인 의사결정이 가능할 것으로 보인다. 둘째로 불투수층, 준자연지 등에 대한 CN 값 할당이 과학적으로 이뤄질 수 있도록 국가 단위에서 활용될 수 있는 공간자료 구축 및 관련 연구가 필요하다. 수요 영역 선정에 있어서도 데이터 구축의 한계로 인해 국가 하천의 500년 빈도 강우 시 범람지 중심으로 이뤄졌으나 향후 지방 하천 등과 국내 실제 여건을 고려한 수요지역 정의 및 평가가 이뤄져야 한다. 마지막으로 계정화는 시간 단위의 기록이 이뤄지는 체계를 가지므로 서비스 흐름을 결정하는 토지피복 자료가 지속해서 업데이트 되어야 하는 중요한 과제를 안고 있다.

### III. 결론

EU에서는 2021년 환경경제통합계정을 채택하였고, 생태계 계정을 부속 계정으로 하여 생태계가 인간에게 주는 다양한 혜택을 지속 관리하기 위한 수단으로 관련 연구를 지속해서 수행해 오고 있다. 국내 생태계서비스 평가 연구는 각 분야별로 진행되어 오고 있으나, 결과의 정책 활용을 위한 체계는 아직 마련되어 있지 않다. 생태계 계정은 경제적 성과를 측정할 때 자연자본(Natural capital)이 경제에 기여하는 영향과 반대로 경제가 환경에 미치는 영향까지 포괄하는 회계 체계이다. 따라서 생태계 계정을 위해서는 생

태계가 주는 다양한 혜택과 흐름을 과학적이고 정량적으로 산정되어야 하며, 시간의 흐름에 따라 이러한 변화의 흐름을 파악할 수 있는 합리적 방법론이 마련되어야 한다.

본 연구에서는 국내 생태계의 홍수조절을 생태계 계정 체계에서 방법론을 검토하고 적용해 보았다. 생태계 제공 영역에 대한 평가는 NRCS-CN 방법론을 활용하였으며 소유역별로 1ha 격자로 CN값을 할당하였다. 유역별 평균 경사를 산정하여 보정을 하였으며, 보정 전후의 차이는 0.83으로 나타났다. 홍수조절 수요 영역은 500년 빈도의 홍수범람예상지도를 활용하였으며, 277개 유역, 168,924ha가 수요 영역으로 파악되었다. 홍수조절 제공 영역과 수요 영역 사이의 실제 흐름을 산정한 결과 약 165,595ha로 산정되었으며, 유역 상류지역의 홍수조절 기능이 비교적 잘 유지되고 있음을 확인할 수 있었다. 서비스의 실제 흐름이 높은 유역의 경제자산 특성을 살펴보면 서쪽을 중심으로 농경지 비중이 높은 것으로 나타났다.

신뢰할 만한 국가 공간 정보의 활용성과 공간 기반으로 한 평가 방식을 고려할 때 EU 실험적 계정화 방법론의 국내 적용성과 정책 활용성은 높을 것으로 판단된다. 추가적인 연구로 CN값에 대한 검증 및 정밀도를 높이기 위한 관련 연구가 수행되어야 하며, 입력 변수에 따른 민감도 분석이 필요할 것으로 보인다. 수요 영역 역시 국가하천 뿐만 아니라 지방하천으로 확대함으로써 지역 차원에서의 토지이용계획과 정책 활용성을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구 결과는 향후 홍수범람지도에서 제공하는 침수심 공간자료와 연계하여 홍수조절서비스의 화폐적 가치 평가에 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 최종적으로 생태계 혜택과 경제활동과의 관계성을 설명할 수 있는 계정화의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 향후 미래 홍수조절서비스 계정 도입을 통해 유역에서의 유역 상류부에 토지이용 및 관리에 대한 객관적인 근거 자료를 확보할 수 있을 것으로 기대되며, 국가 계정 통합을 통한 지속적인 생태계보전 및 유지·관리가 가능할 것으로 판단된다.

## 사사

본 연구는 국립생태원 2023년 생태계서비스 평가 기반 정책 결정 지원 체계 수립(23)(NIE-교육연구-2023-03)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- Barbedo J, Miguez MG, Horst D, Faria Marins M. 2014. Enhancing ecosystem services for flood mitigation: a conservation strategy for peri-urban landscapes?. *Ecology and Society*. 19(2).
- Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Muller F. 2012. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*. 21: 17-29.
- Burkhard B, Maes J. 2017. *Mapping Ecosystem Services* Pensoft Publishers.
- Cho HJ, O JH, Nam BH, Jung KT. 2004. A study on the determination of SCS-CN using GIS, *Journal of KOSGIS*. 12(1): 39-44. [Korean Literature]
- Crossman ND, Nedkov S, Brander L. 2019. Water flow regulation for mitigating river and coastal flooding.
- Fisher B, Turner RK, Morling P. 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*. 68(3): 643-653.
- Geijzendorffer IR, Martin-Lopez B, Roche PK. 2015. Improving the identification of mismatches in ecosystem services assessments. *Ecological Indicators*. 52: 320-331.
- Huang M, Gallichand J, Wang Z, Goulet M. 2006. A modification to the soil conservation service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. *Hydrological Processes*. 20(3): 579-589.
- Jeong SK, Ban YU, Lee TH. 2023. Ecological System Service Factors for Decision-making Support for Urban Flood Migration Planning in Cheong-ju. *Journal of KIEAE*. 23(3): 51-56. [Korean Literature]
- Jung KH, Jung SJ, Son YK, Hong SY. 2007. Classification of Hydrologic Soil Group of Korean Soils, Rural Development Administration (RDA). [Korean Literature]
- Kim JG, Lim KJ, Park YS, Heo SG, Park JH, Kim KS, Choi JD. 2007. The effect of slope-based curve number adjustment on direct runoff estimation by L-THIA. *Journal of Korean Society on Water Quality*. 23(6): 897-905. [Korean Literature]
- Lee TH, Cheon GS, Kwon HS. 2022. Evaluation of Flood Regulation Service of Urban Ecosystem Using InVEST model. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*. 25(6): 51-64. [Korean Literature]
- Ministry of Environment. 2019. Standard Guidelines for Flood Estimation. [Korean Literature]
- Moon GW, Yoo JY, Kim TW. 2014. Comparing Calculation Techniques for Effective Rainfalls Using NRCS-CN Method: Focused on Introducing Weighted Average and Slope-based CN. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*. 34(4). [Korean Literature]
- Schaefer M, Goldman E, Bartuska AM, Sutton-Grier A, Lubchenco J. 2015. Nature as capital: advancing and incorporating ecosystem services in United States federal policies and programs. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*. 112(24): 7383-7389.
- 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.

- Serna-Chavez HM, Schulp CJE, Bodegom PM, Bouten W, Verburg PH, Davidson MD. 2014. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators*. 39: 24-33.
- Sutherland IJ, Villamagna AM, Dallaire CO, Bennett EM, Chin ATM, Yeung ACY, Lamothe KA, Tomscha SA, Cormier R. 2018. Undervalued and under pressure: a plea for greater attention toward regulating ecosystem services. *Ecological Indicators*. 94: 23-32.
- Syrbe R-U, Walz U. 2012. Spatial indicators for the assessment of ecosystem services: providing, benefiting and connecting areas and landscape metrics. *Ecological Indicators*. 21: 80-88.
- Vallecillo S, Kakoulaki G, Notte AL, Feyen L, Dottori F, Maes J. 2020. Accounting for changes in flood control delivered by ecosystems at the EU level. *Journal of Ecosystem Services*. 44.
- 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.