

강수량 및 인구인자를 반영한 수원함양서비스의 공간분포 평가*

조훈우¹ · 송철호² · 전성우² · 김준순³ · 이우균^{2*}

Evaluation of the Spatial Distribution of Water Yield Service based on Precipitation and Population*

Heun-Woo CHO¹ · Chol-Ho SONG² · Seong-Woo JEON²
Joon-Soon KIM³ · Woo-Kyun LEE^{2*}

요 약

최근, 새천년생태계평가(MA: Millenium Ecosystem Assessment), 생태계와 생물다양성의 경제학(TEEB: The Economics of Ecosystems and Biodiversity) 등의 체계에 따라 생태계서비스를 평가하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 기존 대부분의 연구에서는 생태계기능 평가량에 화폐적 가치를 곱하여 생태계서비스를 평가하고 있어 생태계서비스와 관련된 환경 및 사회경제적 조건을 반영하지 못하고 있다. 본 연구에서는 자연 및 사회경제적 요소를 반영한 생태계서비스 평가방안을 제시하고자 하였다. 우선, 수원함양기능을 InVEST의 Water Yield 모형을 통해 평가하였고 수원함양기능에 강수량과 인구를 반영하여 수원함양의 생태계서비스를 평가하였다. 평가결과, 토지피복, 토양 등의 자연조건을 반영한 수원함양기능과 강수량 및 인구 등의 기후 및 사회경제적 인자를 추가적으로 고려한 생태계서비스의 공간분포는 서로 다른 양상을 보였다. 즉, 같은 수원함양기능을 보인 지역이라도 강수량이 적고 인구가 많은 지역에서 수원함양의 생태계서비스가 높은 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 수원함양의 생태계서비스는 수원함양기능에 추가적으로 기상 및 사회경제적 인자를 고려하여 평가되어야 한다는 것을 제시하였으며, 평가과정은 다른 분야의 생태계서비스평가에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

주요어 : 수원함양기능, 강수량, 인구, 생태계 서비스

2016년 4월 22일 접수 Received on April 22, 2016 / 2016년 5월 25일 수정 Revised on May 25, 2016 / 2016년 6월 18일 심사완료 Accepted on June 18, 2016

* 본 연구는 환경부 “기후변화대응 환경기술개발사업” 으로 지원받은 과제임 (Project No. 2014001310008). This work was supported by "Climate Change Correspondence Program" (2014001310008) provided by Ministry of Environment, Korea.

1 ㈜ 이쓰리 E3

2 고려대학교 환경생태공학과 Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University

3 강원대학교 산림경영학과 Department of Forest Management, Kangwon National University

* Corresponding Author E-mail : leewk@korea.ac.kr

ABSTRACT

The study of ecosystem service assessment has been actively researched and developed from Millennium Ecosystem Assessment(MA) and The Economics of Ecosystems and Biodiversity(TEEB). However, current assessments are limited to monetary assessments of ecosystem function and do not account for the effects of environmental factors and socioeconomic status. This study proposes methods to evaluate ecosystem service based on environmental and socioeconomic factors. The study assesses water yield function through the water yield model in InVEST Tool, and evaluates the overall ecosystem service of water yield as reflected by the amount of precipitation and population of the area. Results show that a difference exists between spatial distributions of the ecosystem function of water yield derived from natural conditions such as land cover and soil, and the spatial distribution of the ecosystem service that accounts for climate and socioeconomic factors. The value of ecosystem service increases for an area of higher population and lower precipitation with similar water yield. Thus, the ecosystem service of water yield should be evaluated not only by the water yield function, but also by climate and socioeconomic factors. The evaluation process described for this study should also be applicable to the evaluation of ecological services in other sectors.

KEYWORDS : *Water Yield Function, Precipitation, Population, Ecosystem Service*

서 론

자연자원은 한 생태계 안에 포함된 물질이나 정보들의 양으로써, 자연물을 경제적 재화 및 서비스로 이용 가능한 상태로 인식하는 개념이다(Costanza *et al.*, 1997; de Groot *et al.*, 2002; MA, 2005; TEEB, 2010). 자연자원은 생태계 기능(ecosystem function)에 따라 평가 될 수 있는데, 생태계 기능은 과정에 초점을 맞추어 생태계의 특성, 구조 등의 전체 상호작용 결과를 의미한다. 생태계 기능은 일반적으로 생태계 과정들의 연결성, 구조적인 특징에 따라 발생되어 생태계 서비스를 잠재적으로 발생되게 할 수 있는 요소들의 집합체로 인식되는 순수한 자연 기능이라 할 수 있다(Costanza *et al.*, 1997; de Groot *et al.*, 2002; MA, 2005; TEEB, 2010).

생태계 서비스(ecosystem service)는 인간의 필요를 충족시키기 위한 자연적 과정과 요

소의 생산능력으로 정의된다. 따라서 생태계 서비스는 인간의 인지, 인간의 활동에 의해 발현되는 것으로 인간의 수요에 따라 변할 수 있고 생태계를 바라보는 인간의 관점이 반영된다(Costanza *et al.*, 1997; Fisher *et al.*, 2009; de Groot *et al.*, 2010; Maes *et al.*, 2012). 따라서 생태계 서비스에 대한 연구는 생태계 특성, 구조, 과정 등 생태계 기능에 기반한 자연과학 영역과 재화 및 서비스가 인간 후생에 미치는 영향을 분석하고 측정하고자 하는 사회과학 영역을 함께 공유한다(Collins *et al.*, 2011).

그러나 기존 생태계 서비스 평가에서 여러 개념적 혼란은 지속되고 있다. 국가 수준에서 체코의 생태계 서비스를 평가한 Frélichová *et al.*(2014)는 생태계 서비스를 생태계 기능의 양으로 제시하였으며, 일본의 Ninan and Inoue (2013)의 연구에서도 생태계 기능량에 경제적 가치를 곱하여 생태계 서비스량으로 제시하는 현상이 나타났다. 또한 국내 Kim *et al.*(2010)의 연구 또한 국내 산림을 대상으로 생태계 기

능량에 경제적 가치를 그대로 부여하여 공익적 가치로 재평가하였다. 이는 결국 기능의 양과 다르지 않으며, 인간 후생이 반영된 실질적 수요를 반영하지 못하고 있다. 또한 ‘서비스’라는 용어가 경우에 따라서는 ‘기능,’ 다른 한편으로는 ‘편익’과 동의어로 사용되어 최근의 생태계 기능, 서비스에 대한 개념 정립의 필요성이 대두되고 있다(de Groot *et al.*, 2010 ; Ahn, 2013).

생태계 기능의 경우에는 생태계 순환에 기초한 모형을 적용하는 것이 대부분이다. 그러나 각 생태계 기능은 인간의 수요에 따라 생태계가 어떤 서비스를 제공할 수 있을지에 기반하여 분류한 생태계 서비스 체계와 일치한다고 보기 어렵다. 또한 적절한 의사결정을 위해서는 현재의 적용 체계와의 적합 여부는 물론 각 지역에서의 공간적 적합성을 확인해야 한다(Jeon *et al.*, 2013; Choi *et al.*, 2014). 따라서 생태계 서비스를 평가하기 위한 모형은 대표적으로 인용되는 MA(Millennium Ecosystem Assessment)와 TEEB(The Economics of Ecosystems and Biodiversity)에 근거한 체계의 반영 여부, 입력자료 및 출력자료의 활용 가능성, 공간적 스케일 등을 고려해야 하며, 국내 생태계 기능 및 서비스 평가를 위한 적용에는 공간자료의 가용성과 적용성 분석이 수행되어야 한다(Choi *et al.*, 2014; Song *et al.*, 2015). 그러나 수요적 측면에서의 서비스를 정확히 파악하기 어려운 점이 존재하며, 이에 영향을 미치는 사회경제적인 요소를 공간적으로 제시하는데 어려움이 있다(Collins *et al.*, 2011; Crossman *et al.*, 2013). 따라서 생태계 서비스의 적절한 평가를 위해 사회경제적 요소들을 공간적으로 어떻게 반영할 것인가에 대한 연구가 절실한 상황이다(Chung and Kang, 2013; Song *et al.*, 2016).

본 연구에서는 생태계 기능과 서비스의 상이한 개념 차이를 수원함양서비스를 중심으로 공간적으로 규명하고자 하였다. 수원함양서비스는 공급, 조절, 지원, 문화로 나뉘는 생태계 서비스의 구분 중 공급서비스에 해당한다. 공급서비스는 일정한 재화 및 서비스의 단위에 대한 평가

가 가능하며, 기능에 대한 평가와 함께 사회경제적 인자가 포함된 서비스 편익 개념을 도출하기 위한 본 연구의 목적에 부합한다(Villamagna *et al.*, 2013). 따라서 기능 평가를 위한 모형이 선행연구로부터 제시되어 있으며, 선정된 모형에 대한 국내 적용성 검토가 이뤄진 수원함양서비스를 중심으로 분석이 이뤄졌다(Choi *et al.*, 2014; Song *et al.*, 2015). 이를 위해 수원함양, 강수량, 인구정보를 활용하였으며 기존의 Lee (2007), Kim *et al.*(2010), Song *et al.*(2015)에서 생태계 기능량을 서비스량으로 인식한 것과는 달리, 공간적으로 분석을 통해 생태계 서비스량 평가를 위한 연구의 한계와 향후 발전 방안을 제시하였다.

연구 대상지 및 방법

1. 연구 대상지

본 연구의 대상지는 우리나라로 산림, 초지, 습지 등의 생태계 유형을 포함한 전 지역을 대상으로 하였다. 통계청 SGIS에서 제공하는 2015년 기준 시군구 총 251개 행정구역 중 용진군과 울릉군을 제외한 내륙지방과 제주도 지역에서 연구가 수행되었다(그림 1).

2. 연구 방법

- 1) 자연기반기능(NF), 환경기반서비스(ES), 환경 및 사회기반서비스(ESS) 가정

산림 대기정화 기능 및 서비스에 대해 공간 분석을 통해 구분이 가능함을 제시한 Song *et al.*(2016)의 연구를 바탕으로, 본 연구에서는 수원함량에 대해 InVEST 모형을 통해 기능 값을 모의하여 자연기반기능(NF, Natural Function)으로, 서비스의 경우에는 강수에 따른 수요를 환경기반서비스(ES, Environmental Service), 인구에 따른 수요를 추가로 반영한 것을 환경 및 사회기반서비스(ESS, Environmental Social Service)로 설정하였다. 각 단계에서 적용되는 서비스는 반영지수(RF, Reflecting Factor)를 통해 설정하였다. 이러한 생태계 기능과 서비스

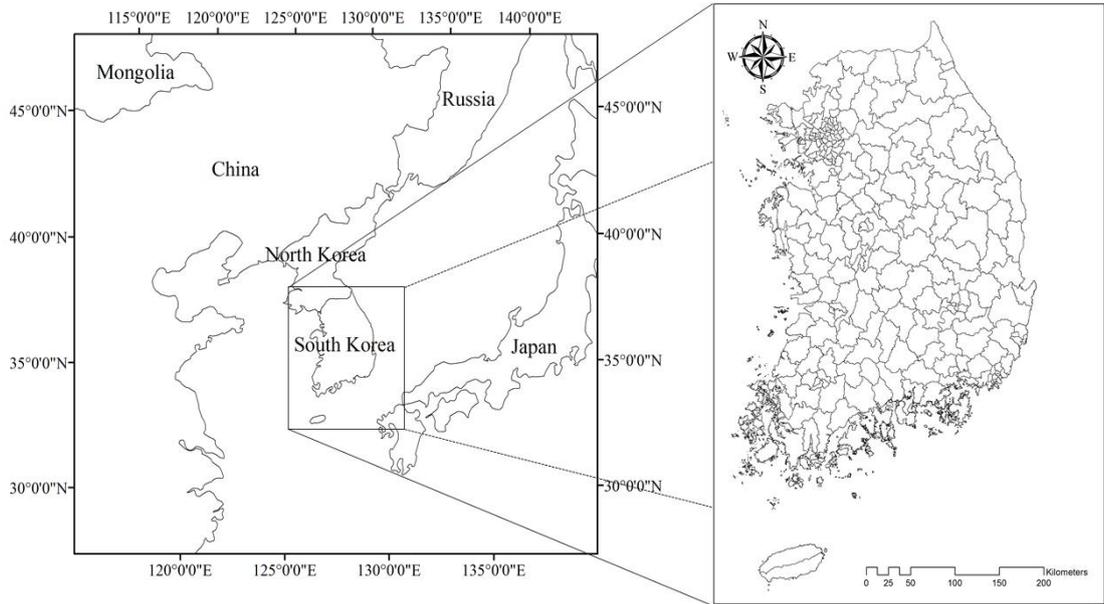


FIGURE 1. Study area and administrative district

의 차이를 규명하는 방법론은 시도된 바가 거의 없으므로 각각의 단계에 대한 가정이 이뤄졌다.

우선 NF 산정시, 토지피복, 토양 등의 자연 생태계의 조건만 반영하였다. 즉, 강수량의 지역별 차이를 반영하지 않고 전국 평균을 적용하였다. 이는 강수의 차이가 아닌 토지피복과 유역구분에 따른 물리적 속성만을 확인 하고자 한 것으로 순수한 기능에 해당한다. 그러나 ES 산정 시에는 강수량에 따른 수요 변동을 전체 하여 강수량의 지역별 차이를 그대로 반영하였다. 따라서 강수가 많이 왔을 경우에는 수자원이 풍부하며, 인간이 상대적으로 누려야 하는 수자원에 대한 수요가 이미 충족되고, 반대로 강수가 적게 왔을 시에는 물이 부족하여, 수자원에 대한 인간의 수요가 상대적으로 높음을 가정하였다. ESS 산정 시에는 수요에 영향을 미치는 요소인 재화 및 서비스에 대한 인간의 선호, 인구, 재화 특성 등 중 인구를 대표로 반영하였으며 전체 수자원 총량에 대해 인구가 많은 지역에서는 상대적 수요가 큰 것으로, 적은 지역에서는 상대적 수요가 적은 것으로 가정되었다(Burkhard et al., 2012; Villamagna

et al., 2013). 또한 ES, ESS 산정 시 수요의 크기인 반영요소 RF는 현 시점에서 정확한 크기를 알기가 어려운 관계로 임의의 값을 적용하였다(그림 2).

본 연구에서는 NF, ES, ESS를 홍수와 가뭄시를 구분하여 평가하였다. 2010년 이후의 최근 시점에서 홍수 시와 가뭄 시를 대표 할 수 있는 시점으로 2011년과 2014년을 선정하였다. 강수량은 기상청에서 제공하는 관측 자료 기반으로 Kriging을 보간법으로 하여 활용하였다. NF 산정을 위해서는 강수량이 평균적인 수준일 경우를 가정하여 기상청에서 제공하는 30년 간 강수량 값인 1,349.6mm를 한반도 전역에 적용 한 래스터를 작성하여 활용하였다. 홍수 시를 대표하는 2011년의 자료는 전반적으로 많았으며, 특히 수도권 지역에 집중되었다. 또한, 2014년을 가뭄시를 대표하는 것으로 설정하였으며 전체적인 강수량이 적은 가운데 수도권의 강수량이 상대적으로 적게 나타났다. 2011년의 수도권 강우량은 약 1,993.3mm이었으며, 2014년은 약 826.8mm에 해당하였다.

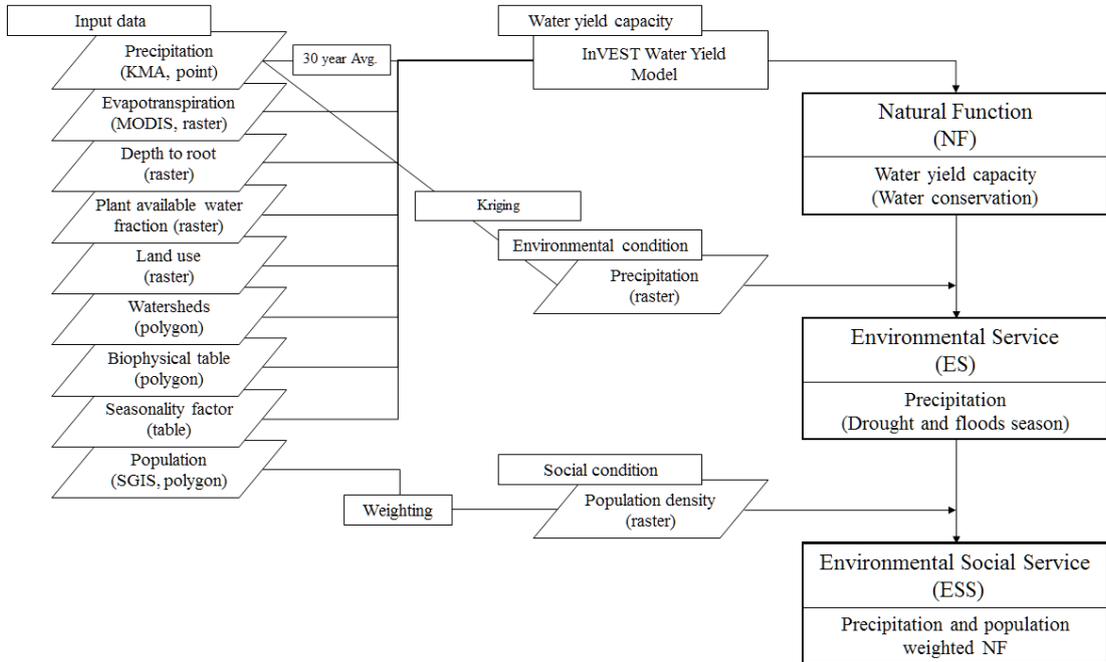


FIGURE 2. Workflow to assess NF, ES, and ESS

2) 자연기반기능(NF) 선정

본 연구에서는 InVEST Water Yield 모형을 국내에 적용한 연구를 바탕으로 NF를 모의하였다. InVEST Water Yield 모형은 생태계 서비스를 공간적으로 평가하기 위한 모형으로 미국에서 개발되어 소프트웨어로 제공되고 있다. 수자원 부분과 관련한 필수적인 구동에 필요한 자료는 총 8가지로 그 특성에 따라 기상

자료, 물리적자료, 속성자료로 구분하고 있다. 본 연구에서는 자료의 불확실성이 있는 추가자료(sub-watersheds, results suffix)와 Watersheds와 중복되는 Sub-Watersheds를 제외하였다(Sharp *et al.*, 2014; Song *et al.*, 2015).

모형의 특성상 InVEST Water Yield는 과정기반 모형으로 해석할 수 있으며, 따라서 수자원이 공급서비스로 제공될 수 있는 잠재량으로

TABLE 1. Input data of InVEST Water Yield

Classification	Input data name	Data from	Description
Meteorological data	Precipitation	Raster	Precipitation
	Reference evapotranspiration	Raster	MODIS evapotranspiration
	Depth to root restricting layer	Raster	Root depth, soil depth
Physical data	Plant available water fraction	Raster	Water porosity, soil map
	Land use	Raster	Land cover map, forest type map
	Watersheds	Shape	Watersheds
Attribute data	Biophysical table	Table	InVEST sample data
	Seasonality factor	Number	1

(Source: Song *et al.*, 2015)

해석해야 할 것이다. 반면 Lee(2007), Kim *et al.*(2010), Oh and Yeo(2011)의 연구는 산림 사업지에서의 연구 결과를 바탕으로 도출된 회귀식에 기반한 실험적 모형으로, '산림 수자원의 실제량이라기 보다는 잠재 저류량'으로 인식하고 있는 차이가 있다. 따라서 본 연구에서는 생태계 서비스로 잠재적으로 제공될 수 있는 생태계 기능량을 공간적으로 모의 하는 것을 목적으로 InVEST 모형을 활용하였다(Choi *et al.*, 2014; Song *et al.*, 2015).

3) 환경기반서비스(ES) 선정

본 연구에서는 2011년도와 2014년도의 강수량을 '1/강수량'으로 변환하는 역수화를 통해 환경 요소를 반영한 ES의 패턴을 모의하였다. 또한 서비스가 발현하는 패턴을 파악하기 위해서 반영지수를 통해 추가로 반영하였다. 생태계 기능은 발현하는 것 자체로도 가치가 있기 때문에 1을 최소값으로 하여 가중치를 부여하는 방법으로 RF는 1에서 k 사이의 값을 가질 수 있으며, 이는 식 (1)과 같이 모의된다. 이 때, V 는 해당 픽셀에서의 강수량 값이며, V_{max} 는 가중치로 보정 될 값 최대값, V_{min} 은 보정될 값의 최소값이다.

$$RF = (k-1)/(V_{max} - V_{min}) \times (V - V_{min}) + k \quad (1)$$

k 값은 다양한 환경 요소를 반영하는 값으로 생태계 기능의 평가량에 대해 생태계 서비스량의 크기를 대변한다고 할 수 있다. 그러나 각 인자들의 정확한 크기를 알기 어렵고 생태계 서비스에 대한 영향을 직접적으로 설명하기 어려운 한계가 있다. 하지만, 사회경제적 요소를 반영한 생태계 서비스 평가에 있어 향후 중요하게 파악되어야 할 부분이다(Wilson and Hoehn, 2006; Ramirez-Andreotta *et al.*, 2014). 따라서 향후에는 다양한 방법으로 k 값은 모의되어야 할 것이다. 본 연구에서는 NF, ES, ESS의 차이를 규명하기 위한 공간적 패턴을 확인

하는 것이 목적이므로 200% 가중치를 ES에 부여하였다. 기존 Song *et al.*(2016)의 연구에서는 해당 계수의 적용을 사회경제적인 요인을 반영한 서비스 추정 시 활용하였으나, 본 연구에서는 이를 ES에도 확대 적용한 것으로 ES는 다음의 식 (2)과 같이 개념적으로 접근이 가능하다.

$$ES = NF \times RF \quad (2)$$

4) 사회기반서비스(ESS) 선정

인구수요 적용을 위해 통계청 SGIS에서 제공하는 인구밀도를 통계 센서스 기반으로 공간화하고 이를 래스터로 전환하였다. 통계 센서스 자료의 경우에는 행정구역보다 세분화된 센서스 조사 단위의 폴리곤 내의 총 인구를 제시하고 있으므로 이를 각 폴리곤의 ha 면적을 적용하여 ha당 인구수로 변환하여 적용하여 k 값을 모의하였다. RF 적용에 있어 인구 밀도의 최대값, 최소값 그리고 각 픽셀에서의 값이 활용되었으며 본 연구에서는 150% 가중치를 가정한 k 값을 설정하여 식 3과 같이 이용하였다.

$$ESS = ES \times RF \quad (3)$$

5) NF, ES, ESS 공간분포 및 관계 분석

본 연구에서는 NF, ES, ESS의 공간분포도를 제작하였다. 즉, 토지피복, 토양조건 등을 고려한 자연기반기능(NF), 공간분포지도, 여기에 강수량을 고려한 수원함양기능의 환경기반서비스(ES) 공간분포지도, 마지막으로 기능-강수량-인구를 함께 고려한 수원함양기능의 환경 및 사회기반서비스(ESS) 공간분포지도를 제작하였다. 각 공간분포지도는 시군구 행정구역별로 제작되었다. 이와 함께 NF, ES, ESS 간의 관계를 분석하기 위해 강수량의 공간 분포를 강수량 크기에 따라 정리하여 각각의 전반적 흐름을 파악하였다. 또한 강우와 인구에 대한 각 영향요인을 함께 분석하였다.

연구 결과

1. 공간분포

1) 자연기반기능(NF) 공간분포

순수한 생태계 기능인 NF의 경우 수원함량으로 나타내며, 본 연구에서 강수는 30년 평균 1,350mm(1985~2014년)가 적용되어, 지역편차는 없고 2011년과 2014년 모두 공간적으로

동일하게 나타났다. NF는 토심이 깊으며 하구 퇴적층이 발달한 지역을 중심으로 높은 곳으로 나타났다. 수도권 지역에서의 불투수층 등에서의 저류량은 모형 결과로 반영되었으나, 시군구 단위의 분석에서는 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 지역은 수도권을 포함한 한강, 낙동강, 금강, 만경강 및 동진강 하류지역이다(그림 3. (a), (b)).

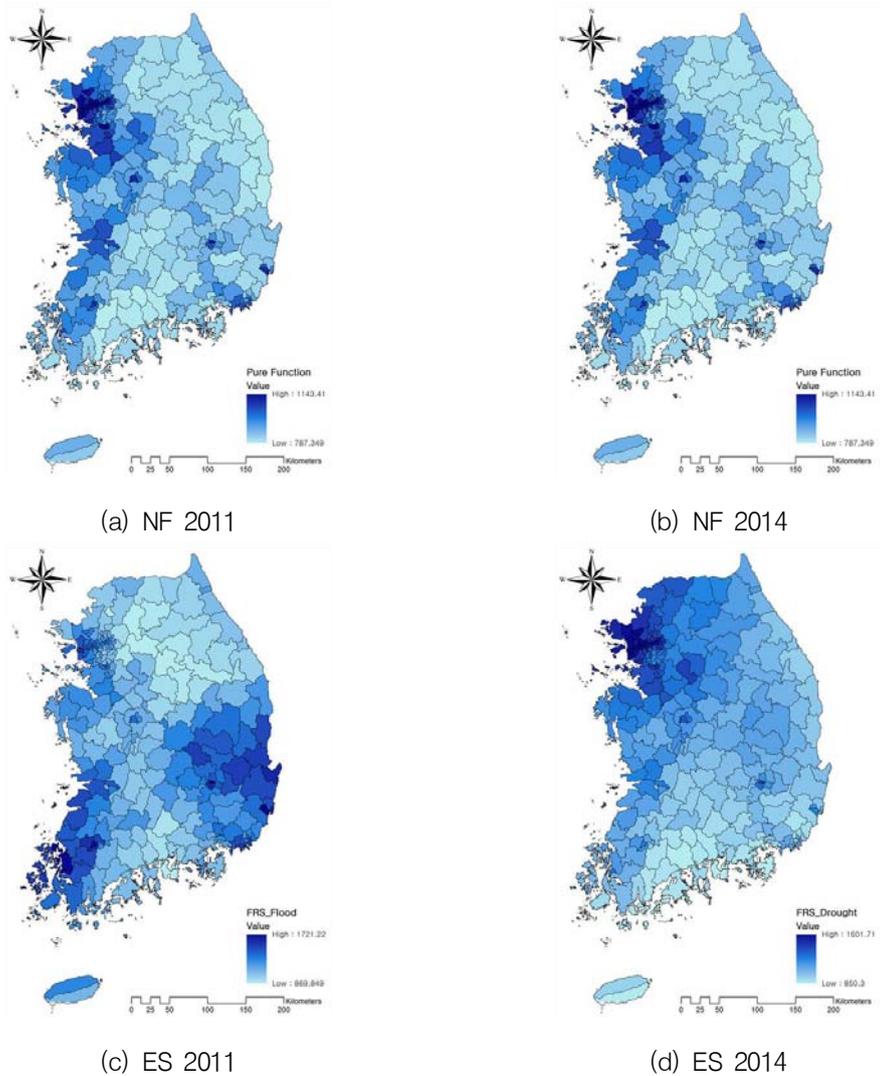


FIGURE 3. Spatial distribution of NF, ES, and ESS

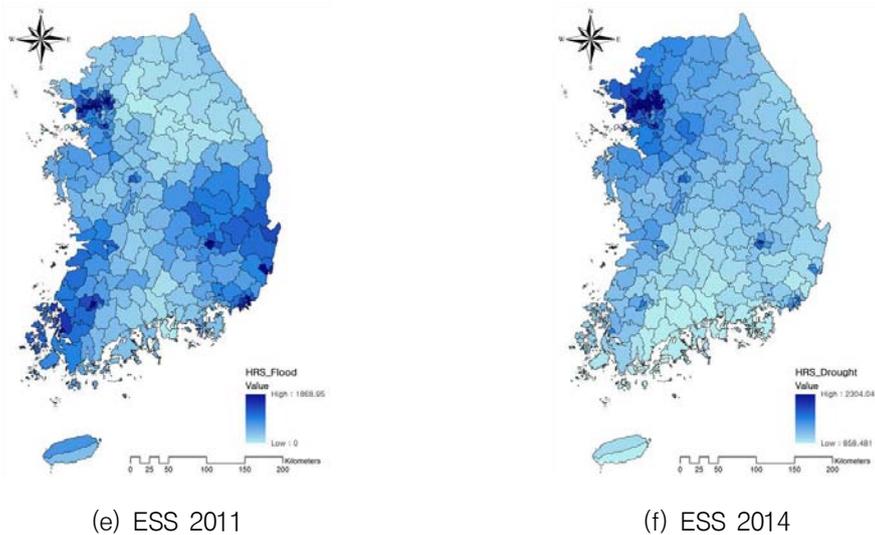


FIGURE 3. Continued

2) 환경기반서비스(ES) 공간분포

NF와 강수량을 고려한 ES의 평가 시기인 2011년에는 전국적으로 평년보다 강수량이 많은 해로 평가된다. 전국적으로 1,600mm를 기록하였으며, 특히 수도권지역은 평균 1,900mm 정도로 나타났다. 2011년 수도권의 ES는 전국에 비해 상대적으로 높게 나타났으며, 2014년 강수량은 890mm로 감소하였으나 수도권에서 ES는 여전히 높은 것으로 나타났다. 이들 두시기를 비교할 경우 2011년 홍수 시 보다 2014년 가뭄 시 수도권지역의 ES가 더 높게 나타나, 비가 많이 내릴 경우 수자원에 대한 수요가 이미 충족되어 ES 자체의 효과는 떨어지며, 비가 적게 내릴 경우 상대적으로 ES의 효과는 높아지는 것으로 파악되었다(그림 3. (c), (d)).

3) 사회기반서비스(ESS) 공간분포

NF와 강수량, 인구를 고려한 ESS의 경우에는 ES와 비슷한 경향을 보이나 인구가 많은 수도권에서 ESS가 높은 것으로 나타났다. 특히 2011년 홍수 시 보다 2014년 가뭄시가 수원함양생태계서비스가 더 높은 것으로 분석되었는데, 이는 비가 적게 내렸지만 인구가 집중된

지역에서 ESS가 큼을 보여주는 결과이다. 앞의 ES와 비교했을 때 홍수 시는 ES 차이가 250mm 정도였으나, 가뭄시의 ES 차이는 450mm로 인구를 고려할 경우, 수원함양생태계서비스 차이가 훨씬 크게 분석되었다(그림 3. (e), (f)).

2. 수원함양 평가결과 관계 분석

수원함양에 대한 NF, ES, ESS의 전체적인 경향을 강수량과 인구 상황에 따라 정리하였다. 일반적으로 강수가 증가할 경우 ES는 감소하고, 강수량이 감소할 경우 ES는 증가하는 경향을 보였다. 이러한 효과는 해당지역의 인구가 반영될 경우 더 큰 차이를 보일 것으로 판단된다. 이들 관계와 현재 본 연구에서 설정한 2011년 홍수, 2014년 가뭄과 연계해서 보면 그림 4와 같은 형태로 정리가 가능하다. 이와 같은 형태에 대해 강수량에 따른 공간적 분포와 NF, ES, ESS의 수원함양(또는 서비스 제공량)을 평가하여 검증의 한 방향으로 연구결과를 도출하였다.

1) 자연기반기능(NF) 평가

자연기반기능에 해당하는 수원함양은 30년

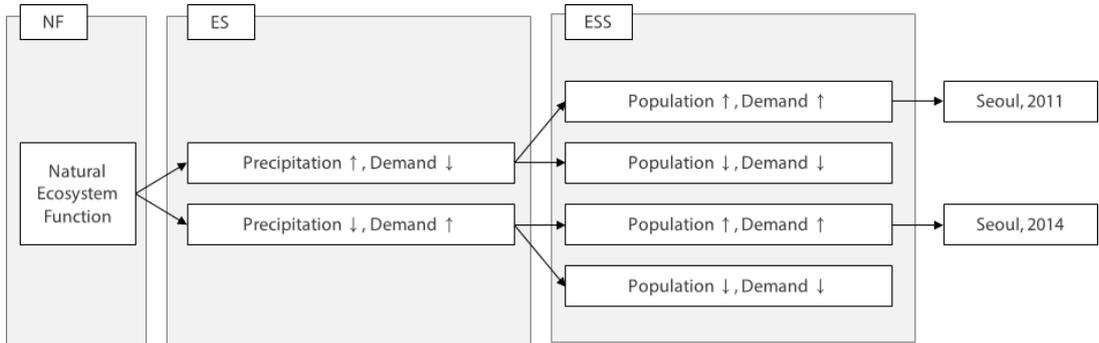


FIGURE 4. NF, ES, and ESS effects on demand conditions

평균 자료를 바탕으로 모의하여 연 평균 강수량이 비슷하고 지역적인 편차가 없게 설정되었다. 강수량의 증가에 따른 NF의 공간분포 분석에서는 강수량의 증가에 따라 NF가 완만하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 30년간의 평균값을 활용하여 NF를 산정함에 따라 평균화 효과가 반영된 것으로 판단된다.

량의 증가함에 ES가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 풍족한 강수량에 따라 수원함양의 필요성이 낮아진 것이 반영된 것으로 자연인자인 강수량과 ES 효과가 어떻게 관계되는지를 보여주는 결과라 생각된다. 그림 5와 그림 6을 비교하면 홍수시의 ES 효과는 1,000~1,450mm 수준이나, 가뭄시의 ES 효과는 650~1,400mm 수준으로 그 폭이 한층 넓어짐을 알 수 있다. 이는 가뭄 시 지역적 특성에 따라 ES 효과가 더 차별적으로 도출되는 것을 보여주는 것이라 판단된다.

2) 환경기반서비스(ES) 평가
 강수량의 증가에 따른 ES의 공간분포는 강수

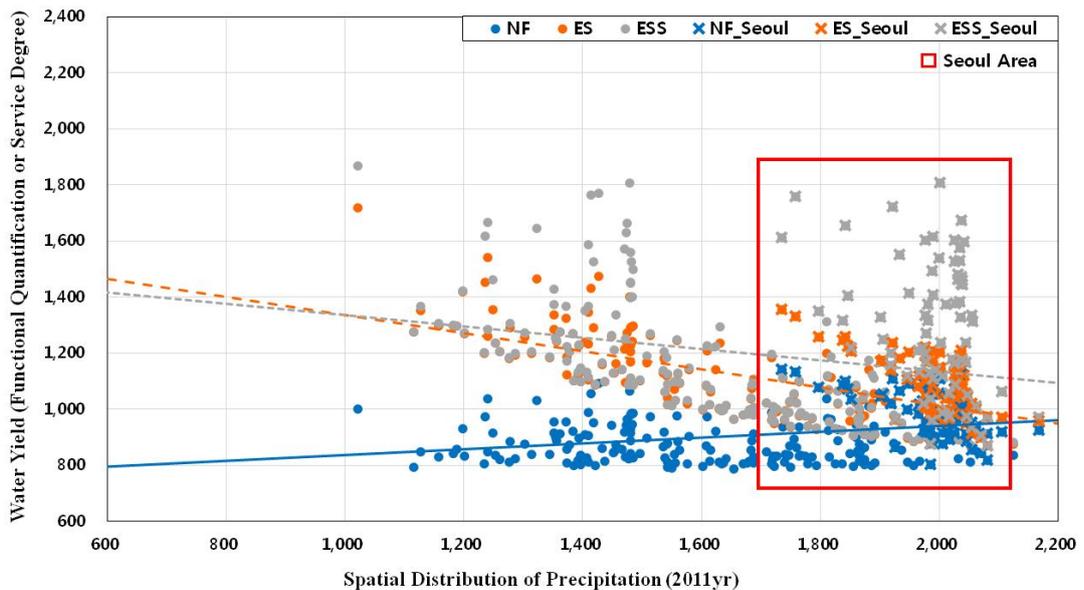


FIGURE 5. Relationship between NF, ES and ESS (flood)

3) 사회기반서비스(ESS) 평가

강수량의 증가에 따른 ESS의 공간분포는 그림 5과 그림 6을 비교하면, 홍수시인 2011년 인구인자를 고려한 ESS 효과의 경우 1,100~1,400mm 수준인 것으로 분석되었으며, 가뭄시인 2014년 ESS 효과는 600~1,600mm 수준의

로 분석되어 인구를 고려할 경우, ES에 비해 ESS가 훨씬 큰 폭의 변화를 가지게 됨을 확인할 수 있다. 이는 가뭄시의 느끼는 ESS에 대한 필요성이 더 크게 부각됨을 확실하게 보여주는 결과이다.

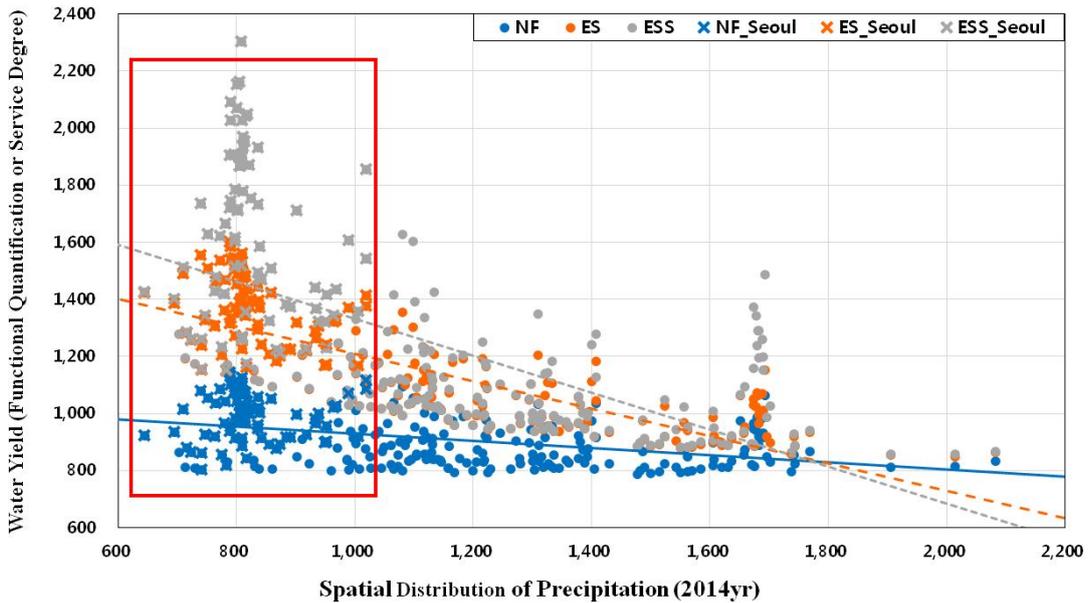
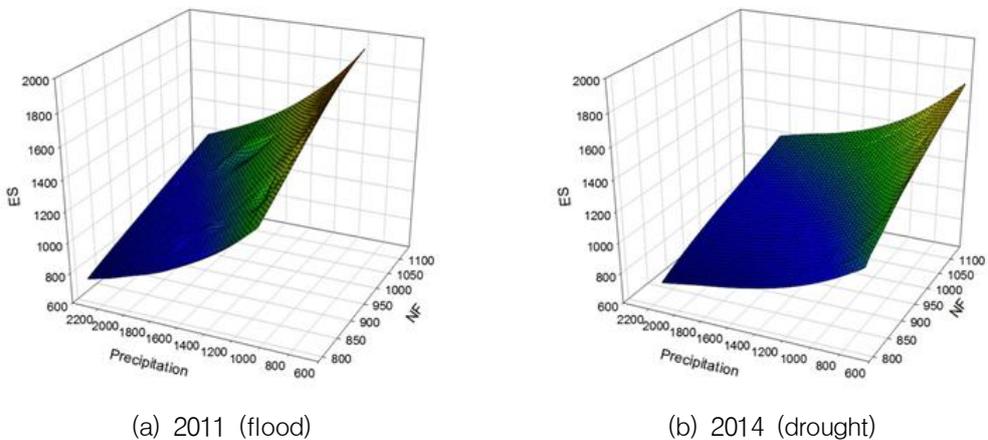


FIGURE 6. Relationship between NF, ES and ESS (drought)



(a) 2011 (flood) (b) 2014 (drought)
FIGURE 7. Relationship between precipitation, NF and ES, NF and ESS

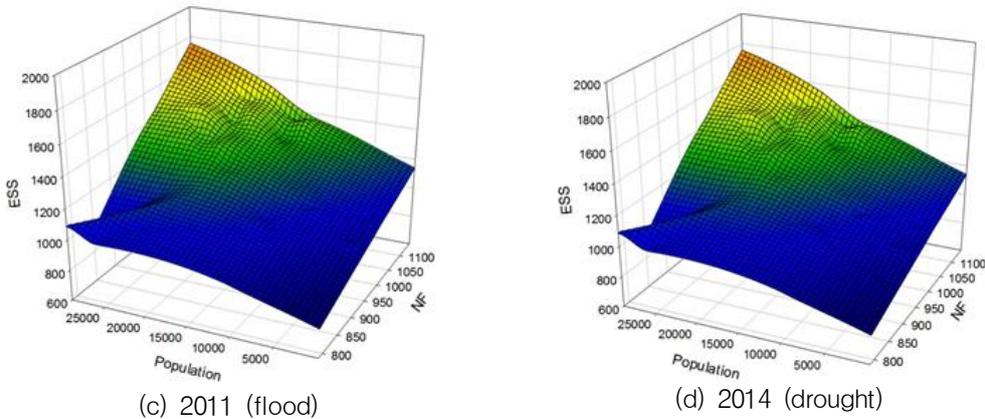


FIGURE 7. Continued

3. NF, ES, ESS 영향요인 분석

강수량과 NF, ES의 관계를 살펴보면 기온 값이 클수록, 강우량이 적을수록 서비스가 커지는 것을 확인 할 수 있었다. 강수량이 적은 곳에서 기능의 효과가 크며, NF가 증가함에 따라 서비스가 증가하는 현상이 나타난다(그림 7 (a), (b)). 인구와 NF, ESS의 관계를 살펴보면 NF가 크고 인구가 많을수록 서비스가 커지는 것을 확인 할 수 있다. 인구가 많은 지역이 NF의 효과가 큰 지역에 해당함에 따른 것으로 보인다. NF 기능이 증가함에 따라 ESS가 증가하는 현상은 마찬가지로 인구에 따른 NF 변화량과 ES, ESS 변화량에 대한 차이를 통해 확인 할 수 있다(그림 7 (c), (d)).

고 찰

기존 생태계 기능과 서비스 간의 개념적 혼란은 최종 편익 계산에 있어서 중복계산을 피하기 위한 이유로 발생하였다(de Groot *et al.*, 2002; de Groot *et al.*, 2010). 따라서 생태계 기능을 평가하고 이에 대해 경제적 단위가치를 곱하여 생태계 서비스를 평가하는 형태를 보여주었다. 본 연구에서 활용한 NF, ES, ESS의 단계는 기존 평가 시 혼재된 평가방법을 나누어 가정된 것이다. 특히 공간적인 평가를 통해 각각

다른 사회경제적 요소의 지역적 편차가 반영될 수 있으며, 생태계 서비스를 평가하는데 다양한 요인들이 적용되어야 함을 제시하였다. 이는 향후 생태계 기능과 서비스의 체계를 구분하고 평가를 고도화 하는데 활용될 수 있을 것이다.

또한, 향후에는 본 연구에서 진행한 수원함양서비스 외의 다른 서비스 평가에서 이러한 방안을 적용할 수 있을 것이다. 이를 위해 생태계 기능 평가 시에는 순수 기능인 NF와 서비스인 ES, ESS 등 대한 인간의 인지와 수요의 상관관계를 보다 심층적으로 파악이 필요하다(Song *et al.*, 2016). 다른 생태계 기능 및 서비스, 예를 들면 수질정화기능의 경우에는 오염물질농도가 증가함에 따라 서비스 수요가 양의 상관관계를 가질 수 있는 사례 등을 연구해야 할 것이다. 특히 본 연구에서 수도권 지역에서의 변화율과 영향이 크게 나타난 것은 향후 NF, ES, ESS 평가 시 환경 요인과 사회경제적 요인 등이 지역적으로 도출될 수 있는 생태계 서비스의 크기에 영향을 다르게 줄 수 있음을 의미한다. 따라서 수도권과 다른 지역을 비교할 시 생태계 기능의 차이는 적으나, 다른 요인들에 의한 서비스의 크기가 다르게 도출될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 NF 산정에 있어서 InVEST 모형을 활용하여 수원함양기능을 평가하였다. 그러나 분석 시에는 시군구 단위의 분석을 수

행하여 토지피복에 따른 저류능력의 차이를 명확하게 반영하지 못하였다. 또한 본 연구는 ES, ESS를 인간의 인지에 맞춰 어떻게 반영할 것인가의 문제와 함께 k 값의 범용적 활용을 위한 접근 방법을 고도화해야 하는 한계점이 있다. 일반적으로 수요에 영향을 미치는 다양한 요소 중 인구를 대표적으로 활용하였으나, 향후에는 다양한 사회적 합의 과정이 필요할 것이다. 이는 여러 사회경제적인 연구가 수반되어야 하는 문제이다(Wilson and Hoehn, 2006). 또한 1/강수량을 한 강수의 역수화를 수행하였는데 k값이 클수록 이 효과, 즉 서비스에 대한 가중치는 커진다고 할 수 있다. 그러나 이렇게 환경 요소를 반영하는 방법에 대해서도 추후 발전이 필요하다. 생태계 리질리언스(ecosystem resilience)의 개념에서 생태계가 원 상태로 돌아 올 수 있는 수준에서의 변화 수준인 임계치에 대한 연구나, 토지 피복 변화 모의에 따른 서비스 변화, 인간 지불 의사의 최대값 및 최소값 등에 대한 연구 적용될 수 있을 것으로 본다(Collins *et al.*, 2011; Kim and Park, 2013; Yoo *et al.*, 2015).

임의로 설정된 200%, 150%의 k 값은 장마철 강수의 2/3이 집중되는 우리나라의 현실을 반영하고, RCP 시나리오 등 기후 예측에 따른 내용과 사회경제적 요소를 고려하여 조정되어야 할 것이다. 현재의 k 값은 생태계 서비스에 대한 수요의 크기를 반영하는 역할을 한다. 따라서 k 값이 커짐에 따라서 체감 수요의 크기가 커지는 역할을 하므로 이 값을 다양하게 적용하고 비교 분석해야 할 필요가 있다. k 값의 설정은 위험도 평가, 안정성 평가, 민감성 평가, 취약성 평가 등과 함께 다양하게 모의되어 활용될 수 있을 것이다. 또한 기능과 서비스의 구분이 이뤄져야 하는 상황에서 k 값은 기능에 서비스 가중치를 반영하는 지표로의 역할이 기대된다.

결 론

본 연구에서는 생태계 기능 및 서비스의 구분을 위하여 자연조건만 고려한 수원함양기능

과 강수량 및 인구를 고려한 수원함양의 생태계서비스를 구분하여 평가하는 새로운 접근 방식을 제시하였다. 우선 InVEST Water Yield에서 모형 구동 시 강수량을 전 지역에 동일하게 반영하여 자연의 물리적 특성만이 반영된 평년 수원함양기능(NF)을 평가하였다. 또한, 물에 대한 수요가 강수량과 밀접한 관련을 있음을 반영하여 환경기반서비스(ES)를 평가하였다. 마지막으로 인구를 반영하여 사회경제적 수요를 대변한 기능-강수량-인구기반의 사회기반서비스(ESS)를 평가하였다.

연구결과, NF는 주로 저지대에서 높은 반면, ES와 ESS는 강수량이 적고 인구가 많은 곳에서 높게 평가되었다. 향후에는 서비스에 영향을 줄 수 있는 보다 다양한 인자들을 고려한 평가가 이뤄져야 할 것이다. 또한, 기능과 서비스의 관계성을 토대로 서비스 정도를 파악할 수 있는 반영지수(RF)에 대한 연구가 추후 필요하다. 반영지수는 서비스의 가중치로 인간 사회가 가지는 생태적 임계치에 대한 수용 정도, 취약성 평가 결과 등을 활용할 수 있을 것으로 보이나, 사회경제적인 추가 연구가 요구된다. 이러한 연구는 다양한 이해관계자의 입장을 대변하는데 보다 효율적으로 활용될 수 있을 것이다. 이에 따라 정책 결정자들은 보다 합리적인 선택지에 다다를 수 있을 것이다. 또한 기존의 개발 및 보전 갈등 해결, 생태계서비스지불제, 각종 부담금과 보조금의 평형성 제고 등을 향상시키는데 도움이 될 것이다. 

REFERENCES

- Ahn, S.E. 2013. Definition and classification of ecosystem services for decision making. *Journal of Environmental Policy* 12(2):3-16 (안소은. 2013. 의사결정지원을 위한 생태계서비스의 정의와 분류. *환경정책연구* 12(2):3-16).
- Burkhard, B., F. Kroll, S. Nedkov and F. Müller. 2012. Mapping ecosystem service

- supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*. 21:17-29.
- Choi, H.A., W.K. Lee, C.H. Song, J.Y. Lee, S.W. Jeon and J.S. Kim. 2014. Applicability analysis of water provisioning services quantification models of forest ecosystem. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 17(4):1-15 (최현아, 이우균, 송철호, 이종열, 전성우, 김준순. 2014. 산림생태계 수자원 공급서비스 계량화 모형의 국내적용성 분석. *한국환경복원기술학회지* 17(4):1-15).
- Chung, M.G. and H. Kang. 2013. A review of ecosystem service studies: concept, approach and future work in Korea. *Journal of Ecology and Environment* 36(1):1-9.
- Collins, S.L., S.R. Carpenter, S.M. Swinton, D.E. Orenstein, D.L. Childers, T.L. Gragson, N.B. Grimm, J.M. Grove, S.L. Harlan, J.P. Kaye, A.K. Knapp, G.P. Kofinas, J.J. Magnuson, W.H. McDowell, J.M. Melack, L.A. Ogden, G.P. Robertson, M.D. Smith and A.C. Whitmer. 2011. An integrated conceptual framework for long-term social-ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9(6):351-357.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton and M. van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387(6630):253-260.
- Crossman, N. D., B. Burkhard, S. Nedkov, L. Willemen, K. Petz, I. Palomo, E.G. Drakou, B. Martín-Lopez, T. McPhearson, K. Boyanova, R. Alkemade, B. Egoh, M.B. Dunbar and J. Maes. 2013. A blueprint for mapping and modelling ecosystem services. *Ecosystem Services* 4:4-14.
- de Groot, R. S., M.A. Wilson and R. M. Boumans. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41(3): 393-408.
- de Groot, R. S., R. Alkemade, L. Braat, L. Hein and L. Willemen. 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity* 7(3): 260-272.
- Fisher, B., R.K. Turner and P. Morling. 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics* 68(3):643-653.
- Frélichová, J., D. Vačkář, A. Pártl, B. Loučková, Z.V. Harmáčková and E. Lorencová. 2014. Integrated assessment of ecosystem services in the Czech Republic. *Ecosystem Services* 8:110-117.
- Jeon, S.W., J.U. Kim and H.C. Jung. 2013. A study on the forest classification for ecosystem services valuation - focused on forest type map and landcover map-. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 16(3):31-39 (전성우, 김재욱, 정휘철. 2013. 생태계 서비스 가치평가를 위한 산림 유형 분류 방안 -임상도와 토지피복지도 활용을 중심으로-. *한국환경복원기술학회지* 16(3):31-39.
- Kim, J.H., K.D. Kim, R.H. Kim, C.Y. Park, H.J. Yoon, S.W. Lee, H.T. Choi and J.J. Kim. 2010. A study on the estimation and the evaluation methods of public function of forest, research report 10-

26. Korea Forest Research Institute. p.205 (김중호, 김기동, 김래현, 박찬열, 윤호중, 이승우, 최형태, 김재준. 2010. 산림의 공익기능 계량화 연구, 연구보고 10-26. 국립산림과학원. 205쪽).
- Kim, J.S. and S.Y. Park. 2013. A prediction and analysis for functional change of ecosystem in South Korea. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 16(2): 114-128 (김진수와 박소영. 2013. 생태계 용역가치를 이용한 대한민국 생태계의 기능적 변화 예측 및 분석. *한국지리정보학회지* 16(2):114-128).
- Lee, M.K. 2007. Opportunity cost for increasing watershed conservation function of forest -a case study of Sueo Dam catchment area in Mt. Baekun Jeollanamdo-. Master's Thesis, Seoul Nat'l Univ., Seoul, Korea. p.66 (이민경, 2007. 산림유역의 수원함양 유지·증진을 위한 기회비용 -전남 광양 진상면 수어지 유역의 사례를 중심으로-. 서울대학교 대학원 석사학위논문. 66쪽).
- MA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. Millennium ecosystem assessment ecosystems and human well-being. Island Press, Washington DC. p.917.
- Maes, J., B. Egoh, L. Willemen, C. Liqueste, P. Vihervaara, J.P. Schägner, B. Grizzetti, E.G. Drakou, A.L. Notte, G. Zulian, F. Bouraoui, M.L. Paracchini, L. Braat and G. Bidoglio. 2012. Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. *Ecosystem Services* 1(1):31-39.
- Ninan, K.N. and M. Inoue. 2013. Valuing forest ecosystem services: case study of a forest reserve in Japan. *Ecosystem Services* 5:78-87.
- Oh, D.H. and U.S. Yeo. 2011. Improvement of forest public functions in Busan: application of monetary valuation. Busan Development Institute. p.77 (오동하, 여운상. 2011. 산림의 가치평가를 통한 공익기능 향상 방안. 부산발전연구원. 77쪽).
- Ramirez-Andreotta, M.D, M.L. Brusseau, J.F. Artiola, R.M. Maier, A.J Gandolfi. 2014. Environmental research translation: enhancing interactions with communities at contaminated sites. *Science of The Total Environment* 497:651-664.
- SGIS (Statistical Geographic Information Service). URL: http://sgis.kostat.go.kr/contents/shortcut/shortcut_05.jsp (Accessed December 1, 2016).
- Sharp, R., H.T. Tallis, T. Ricketts, A.D. Guerry, S.A. Wood, R. Chaplin-Kramer, E. Nelson, D. Ennaanay, S. Wolny, N. Olwero, K. Vigerstol, D. Pennington, G. Wlonsdorf, C. Kennedy, G. Verutes, C.K. Kim, G. Guannel, M. Papenfus, J. Toft, M. Marsik, J. Bernhardt, R. Griffin, K. Glowinski, N. Chaumont, A. Perelman, M. Lacayo, L. Mandle, R. Griffin, and P. Hamel. 2014. InVEST tip user's guide. The Natural Capital Project, Stanford, p.320.
- Song, C., W.K. Lee, H.A. Choi, J. Kim, S.W. Jeon, and J.S. Kim. 2016. Spatial assessment of ecosystem functions and services for air purification of forests in South Korea. *Environmental Science & Policy* 63:27-34.
- Song, C.H., W.K. Lee, H.A. Choi, S.W. Jeon, J.U. Kim, J.S. Kim and J.T. Kim. 2015. Application of InVEST Water Yield model for assessing forest water provisioning ecosystem service. *Journal*

- of the Korean Association of Geographic Information Studies 18(1): 120–134 (송철호, 이우균, 최현아, 전성우, 김재욱, 김준순, 김정택. 2015. 산림의 수자원 공급 생태계 서비스 평가를 위한 InVEST Water Yield 모형의 적용. 한국지리정보학회지 18(1):120–134).
- TEEB(The Economics of Ecosystems and Biodiversity). 2010. The economies of ecosystems and biodiversity: ecological and economic foundations. Edited by Pushpam Kumar. Earthscan. London and Washington.
- Villamagna, A. M., P. L. Angermeier and E. M. Bennett. 2013. Capacity, pressure, demand, and flow: a conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. *Ecological Complexity* 15: 114–121.
- Wilson, M.A. and J.P. Hoehn. 2006. Valuing environmental goods and services using benefit transfer: the state-of-the-art and science. *Ecological Economics* 60(2):335–342.
- Yoo, S.M., W.K. Lee, Y. Yamagata, C.H. Lim, C.H. Song, H.A. Choi. 2015. Analyzing residential land use change and population density considering climate change using land use equilibrium model in Jeju. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 18(4):43–58 (유소민, 이우균, 야마가타 요시키, 임철희, 송철호, 최현아. 2015. 토지이용균형모형을 이용한 기후변화에 따른 제주도 지역의 주거용 토지이용변화와 인구 밀도 예측. 한국지리정보학회지 18(4):43–58). **KAGIS**