

Research Paper

생태계서비스 번들을 이용한 경기도 도시의 유형화

김일권 · 김성훈 · 이주은 · 권혁수
국립생태원 생태평가연구실 생태계서비스팀Categorization of Cities in Gyeonggi-do
Using Ecosystem Service Bundles

Ilkwon Kim · Sunghoon Kim · Joeun Lee · Hyuksoo Kwon

Team of Ecosystem Services, National Institute of Ecology

요약: 생태계서비스의 개념은 지역의 생태자원을 관리하고 효율적으로 사용하는데 중요하다. 지역 생태계가 동시에 제공하는 다양한 생태계서비스는 생태계서비스 번들로 표현된다. 생태계서비스 번들은 지역 생태계서비스 특성을 파악하고, 유사한 생태계서비스를 제공하는 지역들을 그룹화하여 지역 생태계서비스 관리정책을 용이하게 한다. 본 연구는 경기도 도시들을 대상으로 11개 생태계서비스 항목들을 모형과 통계지표를 이용하여 평가하고, 시군별 생태계서비스 번들을 제작하였다. 또한 생태계서비스 평가결과에 대한 주성분분석과 클러스터분석을 수행하여 경기도 시군들을 유형화하였다. 연구결과 경기도 도시들의 생태계서비스는 조절, 문화, 공급서비스 유형들로 분류되며 각각의 유형들은 지역특성에 따라서 도시형, 도시산림형, 농촌형, 산림형으로 구분되었다. 각각의 유형들은 지역의 인문사회 및 자연환경 특성을 반영하는 토지이용과 연관되어 나타났다. 본 연구결과는 지역 생태계서비스 특성을 파악하는데 중요한 정보를 제공하여 지역 생태계서비스 관리정책을 수립하는데 유용하게 사용될 수 있다.

주요어: 생태계서비스, 번들, 클러스터분석, 지역유형화

Abstract: The concept of ecosystem services is important for the effective management of regional ecological resources. Multiple ecosystem services provided by regional ecosystems are represented as ecosystem service bundles, which define the co-occurrent ecosystem services in a specific region. Bundles provide useful information to identify regional characteristics of ecosystem services and categorize sub-regions with similar patterns of ecosystem service provision. We assessed eleven ecosystem services using modeling approaches and statistical data and produced bundles of cities in Gyeonggi-do. We also conducted principal component analysis and cluster analysis to categorize these cities according to the characteristics of ecosystem services. The results indicated that the cities in Gyeonggi-do were categorized into three groups depending on the types of provision, regulation, and

First Author: Ilkwon Kim, Tel:+82-44-950-5462, E-mail: ikkim@nie.re.kr, ORCID: 0000-0002-6035-4359

Corresponding Author: Hyuksoo Kwon, Tel: +82-44-950-5452, E-mail: ulmus@nie.re.kr, ORCID: 0000-0001-7077-9273

Co-Authors: Sunghoon Kim, E-mail: dark4v@nie.re.kr, ORCID: 0000-0001-9075-249X

Joeun Lee, E-mail: joeun0516@nie.re.kr, ORCID: 0000-0002-8422-3097

Received: 31 December, 2018. Revised: 1 May, 2019. Accepted: 7 June, 2019.

cultural services, and were designated as urbanized, urban-forest, agriculture, or forest cities. These groups were influenced by land use patterns reflecting regional social-environmental features. The results provide useful information for identifying regional ecosystem services and facilitate decision-making in regional ecosystem service management.

Keywords : Ecosystem service, bundle, cluster analysis, regional classification

I. 서론

생태계서비스는 생태계가 인간사회에 제공하는 다양한 혜택을 의미하며 공급, 조절, 문화, 지지서비스의 유형으로 구분된다(Millennium Ecosystem Assessment 2005). 지역의 생태계서비스는 인간과 자연의 활동과 상호작용으로 나타나는 다양한 요인들에 의해서 영향을 받으며, 생태계서비스의 변화는 인간사회의 복지에 영향을 미친다. 그러므로 생태계서비스들을 정량적으로 평가하는 것은 경관계획과 같은 의사결정과정에 필요한 정보를 제공한다(Queiroz et al. 2015).

생태계를 구성하는 다양한 요소들의 구조와 과정은 다양한 기능으로 나타나며, 생태계의 다기능성은 여러 종류의 생태계서비스를 시공간적으로 동시에 제공하도록 한다(Bennett et al. 2009). 동시에 나타나는 생태계서비스들은 서로 상관관계를 가지는 번들(bundle)의 형태로 나타난다(Bennett et al. 2009; Queiroz et al. 2015). 생태계서비스 번들은 “시공간적인 측면에서 동시에 나타나는 다양한 생태계서비스들의 묶음”으로 정의되며 지역단위에서 생태계의 다기능성을 평가하는데 사용된다(Raudsepp-Hearne et al. 2010). 생태계서비스 번들은 개별적으로 평가된 생태계서비스를 종합적으로 평가하고 이를 시각적으로 표현하여, 해당 지역들의 생태계가 제공하는 생태계서비스의 공급역량을 나타낸다(Raudsepp-Hearne et al. 2010; Crouzat et al. 2015). 또한 생태계서비스 번들은 다양한 생태계서비스 항목들 사이의 상관관계를 파악하여, 잠재적 시너지와 트레이드오프에 대한 평가를 가능하게 한다(Bennett et al. 2009; Baro et al. 2017).

Raudsepp-Hearne et al.(2010)은 캐나다 퀘벡 지역을 대상으로 생태계서비스 번들을 제작하고 주

성분 분석을 수행하여 생태계서비스들 간의 상관관계를 파악하고, 클러스터 분석을 수행하여 번들 형태에 따라 행정구역들을 유형화하였다. 이들이 제시한 생태계서비스 번들의 시각화 방법과 클러스터 분석 기반의 유형화는 이후 다양한 연구에서 적용되고 있다(Spake et al. 2017). Crouzat et al.(2015)은 생태계서비스 번들을 제작하고, 이를 이용하여 경관이 질성을 평가하는데 사용하였다. Queiroz et al.(2015)은 생태계서비스 번들 제작과 지역들을 유형화를 수행한 후, 다양성지수(diversity index)를 이용하여 유형별 번들의 생태계서비스 다양성을 평가하였다. Hamann et al.(2015)은 생태계서비스 번들을 제작하고, 다중로지스틱 회귀분석을 수행하여 생태계서비스 번들의 공간분포상의 차이를 야기하는 사회-생태적 요인들을 파악하였다. Derkzen et al.(2015)은 기존 연구들에서 공간스케일을 축소하여 도시 내 구역들을 대상으로 번들을 제작하고 유형화한 뒤, 도시녹지에서 제공되는 생태계서비스들과 연결시켰다. Renard et al.(2015)은 번들을 이용하여 파악된 생태계서비스 공급특성과 지역의 사회경제 및 자연환경적인 요인들과의 상관관계를 분석하였다. Yang et al.(2015)은 유역권내에 위치한 도시들을 대상으로 생태계서비스 번들을 제작하고 이를 유형화하였으며, 이를 도시별로 상세한 토지이용과 연결하여 해석하였다. Baro et al.(2017)은 공급과 수요측면에서 생태계서비스 번들을 구분하여 작성한 뒤 유형별로 공급과 수요특성을 파악하였다. 이와 같이 해외의 많은 연구에서 번들을 제작하는 것 뿐 아니라, 번들을 정량 혹은 정성적으로 분석하여 공간분포의 특징과 생태계서비스 잠재요인들을 파악하는 연구들이 수행되는 방향으로 진행되고 있다.

특히 지자체별 생태계서비스 평가는 다양한 형태

의 자료들을 이용하여 다양한 서비스 항목들을 평가할 수 있으며, 그 결과를 지역계획에 적용할 수 있는 최소 공간단위이기 때문에 유용하다(Sparke et al. 2017). 지자체별 생태계서비스 번들평가 결과는 주 성분분석과 함께 사용되어 생태계서비스 항목들 사이의 상관관계를 파악하는데 사용된다(Yang et al. 2015). 또한 군집분석을 수행하여 생태계서비스 분포특성에 따라서 지자체들을 유형화한다. 이러한 유형화결과는 해당 지자체의 생태계서비스에 대한 전반적인 정보를 제공하며, 다른 지자체와의 유사성과 차이점을 반영하는 생태계서비스 관리정책을 수립하는데 도움이 되기 때문에 많은 번들연구에서 함께 수행되고 있다(Sparke et al. 2017).

국내에서는 NIE(2018)가 국내 12개 시군을 대상으로 생태계서비스 번들을 제작하여 생태계서비스 분포특성에 따라 유형화를 수행하였고, 이를 토지이용과 인구를 기반으로 분류된 지역유형 결과와 비교하였다. 그러나 특정 광역단위에서 지자체별 생태계서비스 평가를 수행하고, 번들을 제작하여 지역을 유형화한 연구는 부족하다. 그러므로 본 연구는 경기도 시군별 생태계서비스 평가결과에 대한 번들을 제작하고, 시군들을 유형화하여 경기도 지역의 생태계서비스 특성을 파악하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구지역

본 연구에서는 경기도 지역을 대상으로 시군별 생태계서비스 분포특성을 파악하였다. 경기도는 서울과 인천시의 주변에 위치한 31개 시군을 포함하는 광역단체이다. 2017년 기준으로 1287만 명의 인구 중 93%가 도시지역에서 거주하며 도시성장에 따른 인구증가가 지속적으로 진행되고 있다. 경기도의 시군들은 도시규모와 인구분포가 각각 다르며, 도시 특성들도 서울 주변에 위치한 산업 및 정주도시들과 외곽에 위치한 접경도시 및 농촌형 소도시들로 구분된다. 이러한 도시특성의 차이로 인하여 도시에서 제공하는 생태계서비스들이 각각 다르게 나타나기 때문에 생태계서비스 관리를 위해서는 지자체별 도

시특성과 생태계서비스 공급특성을 파악하는 것이 필요하다. 또한 행정구역별로 수행되는 생태계서비스 평가와 지역유형화는 지역 경관에 존재하는 다양한 사회-생태시스템의 상호작용을 이해하는데 유용하다(Raudsepp-Hearne et al. 2010). 본 연구에서는 경기도에 위치하는 시군들을 대상으로 생태계서비스 분포특성을 파악하고, 이를 유형화하고자 한다.

2. 생태계서비스 평가

공급, 조절, 문화, 지지서비스로 구분되는 생태계서비스는 각 유형과 지표에 따라서 다양한 평가방법들이 존재한다. 본 연구는 생태계서비스를 평가하기에 앞서 경기도 기초지자체 수준에서 생태계서비스 평가를 위해 잠재지표로서 사용될 수 있는 자료 및 연구방법론의 적용가능성을 기준으로 생태계서비스 항목들을 선정하였다. 이에 따라 공급서비스는 작물, 가축, 임산물, 수자원, 조절서비스는 대기, 기후, 침식, 지지서비스는 종다양성과 서식지, 문화서비스는 여가, 생태관광을 선정하였다. 생태계서비스 평가에서 가장 많이 활용되는 자료는 토지피복도이다. 본 연구의 경우 환경부가 제작한 2014년 세분류토지피복도를 이용하여 생태계서비스의 평가가 수행되었으며, 기준연도를 통일하기 위해서 통계연보도 2014년 자료를 이용하였다.

작물생산은 생태계가 제공하는 작물생산능력으로 단위면적당 경지면적 비율을 통해서 평가된다(Raudsepp-Hearne et al. 2010). 본 연구는 경기도 통계연보의 시군 전체면적대비 농경지비율을 이용하여 작물생산을 평가하였다.

가축생산은 생태계가 가축생산에 기여하는 서비스로 사육되는 가축의 숫자를 통해서 평가된다(Queiroz et al. 2015). 다만 가축의 수를 이용하여 평가할 경우 양계 비율이 높은 지역이 양돈이나 축우 비율이 높은 지역에 비해 과다 추정되므로 정육량을 이용하기도 한다(NIE 2018). 본 연구에서도 축산유통종합정보센터에서 제공하는 가축 종류별 평균 정육량(한우 265.6kg/마리, 돼지 57.7kg/마리, 닭 1.30kg/마리)을 경기도통계연보의 가축사육량에 곱하여 지역별 가축생산을 평가하였다.

임산물생산의 경우 산림에서 생산되는 목재나 약용자원의 양을 이용하여 평가가 가능하다. 본 연구에서는 산림청의 임산물생산조사통계자료를 이용하여 산림에서 생산된 다양한 임산물의 경제적가치를 산정한 임산물생산액을 지표로 이용하였다.

수자원공급은 생태계의 구성요소들이 수문과정을 통해서 수자원을 공급하는 서비스이다(Francesconi et al. 2016). 국내에서 InVEST water yield 모형을 이용하여 산림에서 공급되는 수자원의 잠재량을 평가한 Song et al.(2016)을 참고하여 경기도 지역의 수자원 잠재량을 평가하였으며, 입력자료는 세분류 토지피복도, 기상청 강수량자료, MODIS16의 Global Evapotranspiration을 이용하였다.

대기조절은 식생구성요소들이 대기오염물질을 흡수하여 대기질을 개선시키는 서비스이다(Gomez-Baggethun et al. 2013). 본 연구에서는 KFRI(2017)에서 제시한 산림단위면적(ha)당 연간오염물질 흡수량 자료에서 대표적인 대기오염물질인 SO₂, NO₂, PM₁₀ 흡수량 값을 세분류토지피복도 상의 산림과 과

수원면적에 할당하여 평가하였다.

기후조절은 식생이 탄소를 흡수하여 기후변화를 완화시키는 서비스로(Conte et al. 2011), InVEST carbon 모형을 이용하여 계산되는 식생과 토양이 저장하는 탄소저장량으로 평가된다. 본 연구는 InVEST carbon모형을 이용하여 탄소저장량을 평가한 Roh et al.(2016)의 탄소포복계수 값을 세분류토지피복도에 적용하여 경기도에 적용하여 기후조절을 평가하였다.

침식조절은 식생이 토양침식을 억제하는 양을 산정하여 평가가 가능하다. RUSLE 모형을 기반으로 제작된 InVEST SDR모형을 이용하여 연간토양보유량을 평가한 NIE(2017)을 참고하여 침식조절을 평가하였으며, 입력자료는 세분류토지피복도, 국립농업과학원 정밀토양도, Digital Elevation Model (DEM)을 이용하였으며 강우침식인자는 Risal et al.(2016)의 값을 이용하였다.

조류는 풍부한 종다양성과 관측의 용이성으로 인하여 서식지와 생물다양성 평가에 활용된다(Verner

Table 1. Indicators and methodology of ecosystem services

Ecosystem service	Abbreviation	Indicator	Unit	Method	Reference	
Provision	Crop production	P_crop	Agricultural area	%	Agricultural areas by statistics data	Raudsepp-Hearne et al. (2010)
	Livestock production	P_livestock	Amount of fresh meat	ton/km ²	Amount of fresh meat from livestock (cattle, hog, poultry)	Queiroz et al. (2015)
	Forest production	P_forest	Value of Forest products	won/km ²	Amount of forest production by statistics data	NIE (2017)
	Water provision	P_water	Water yield	ton/ha	InVEST water yield model	Song et al. (2016)
Regulation	Air quality control	R_air quality	Pollutant sequestration	kg/ha	SO ₂ , NO ₂ , PM ₁₀ sequestration by vegetation	KFRI (2017)
	Climate control	R_climate	Carbon stock	ton/ha	InVEST carbon model	Roh et al. (2016)
	Erosion control	R_erosion	Soil retention	ton/ha	InVEST SDR model	NIE (2017)
Supporting	Biodiversity	S_biodiversity	Observed bird	number of species/area	3rd national natural environment investigation	NIE (2017)
	Habitat	S_habitat	Natural habitat	area/km ²	Area with 1st and 2nd grade in ecological maps	Egoh et al. (2012)
Cultural	Recreation	C_recreation	Area ratio of park	area/km ²	Park areas by statistics data	Raudsepp-Hearne et al. (2010)
	Ecotourism	C_ecotourism	Area of Ecotourism site	area/km ²	Area of ecological assets designated by ministry of environment	Raudsepp-Hearne et al. (2010)

et al. 1986; Park et al. 2012). 본 연구는 전국을 대상으로 동식물의 종류와 공간분포를 조사한 제 4차 전국자연환경조사를 이용하여 파악된 조류의 출현중수를 이용하여 종다양성을 평가하였다.

서식지의 경우 생물서식지의 지도나 보호지역의 면적을 통해서 공간평가가 수행된다(Egoh et al. 2012). 생태자연도 1등급지역은 멸종위기종의 서식지, 우수경관지역, 생물의 지리적 분포한계지점, 식생군락들을 포함하며, 2등급 지역은 1등급보다는 중요도는 낮지만 서식지와 식생군락의 가치를 가진다. 그러므로 본 연구에서는 생태자연도의 1등급과 2등급 지역을 주요서식지로 간주하여 평가하였다.

여가서비스는 도시공원과 도시녹지가 제공하는 대표적인 문화서비스로(Niemela et al. 2010), 주민들이 여가 및 휴양활동을 하는 녹지공간의 면적으로 평가된다(Rausepp-Hearne et al. 2010; Yang et al. 2015). 본 연구는 경기도 도시공원현황자료를 이용하여 산출한 시군별 도시공원면적을 이용하여 여가서비스를 평가하였다.

생태관광은 생태자원을 이용한 인간이 혜택을 받는 문화서비스로 단위면적당 관광자원의 숫자나 면적으로 평가된다(Rausepp-Hearne et al. 2010). 본 연구는 환경부에서 지정한 생태자원 중 공간자료로 구축된 자연공원(국립, 도립 및 군립공원), 생태경관보전지역, 습지보호지역, 해안사구, 철새도래지의 면적을 이용하여 평가하였다. 본 연구에 이용된 생태계서비스 지표들과 평가방법을 정리하면 다음과 같다(Table 1).

3. 생태계서비스 번들제작

생태계서비스 번들은 시공간적으로 동시에 나타나는 생태계서비스들을 표현하며, 이들의 분포는 지역에서의 인간활동과 토지이용에 따른 결과로 나타난다(Sparke et al. 2017). 그러므로 생태계서비스 번들은 지역 생태계서비스의 현황을 파악하며 지역의 생태계서비스 관리를 위한 의사결정과정에서 기여한다(Crouzat et al. 2015).

많은 연구들이 생태계서비스들의 평가결과를 원형 그래프로 제작한 번들을 이용하여 지역별 비교를 수

행한다(Raudsepp-Hearne et al. 2010; Queiroz et al. 2015; Yang et al. 2015; Baro et al. 2017). 본 연구도 시군별 생태계서비스 평가결과를 원형그래프를 이용하여 시각적으로 표현하여, 시군별 생태계서비스 특성을 파악하였다. 비율로 평가된 생태계서비스 지표별 평가결과를 시군면적으로 나누어 단위면적(km²)당 생태계서비스 공급량 값을 산정하였다. 개별 평가단위를 통일하기 위해 개별 생태계서비스 항목별 최댓값을 기준으로 평가결과를 정규화하여 0-1사이의 지수로 변환하였다(Queiroz et al. 2015). 이러한 과정을 통해서 얻어진 생태계서비스 항목별 정규화결과를 원형그래프로 시각화하여 생태계서비스 번들을 제작하였다. 생태계서비스 번들은 R소프트웨어의 ggplot 패키지를 이용하여 시각적으로 표현되었다.

4. 시군별 생태계서비스 유형화

지역별 유형화는 시군들 간 생태계서비스의 유사성과 차이점을 기준으로 비슷한 분포특성을 가지는 시군들을 유형화하여, 지역별 생태계서비스 공간분포특성과 생태계서비스 항목들간의 상관관계를 파악하는데 용이하다(Bennett et al. 2009). 이를 통해 생태계서비스 분포가 유사한 지역들의 공간분포특성이 유사하기 때문에 관리측면에서 효율적이고, 다른 지역에서 수행되는 생태계서비스 관리방안들을 참고하여 적용할 수 있다(Yang et al. 2015). 주성분분석과 군집분석은 개별적으로 평가된 다양한 생태계서비스 항목들을 기준으로 지역을 유형화하는데 널리 활용되고 있다(Sparke et al. 2017).

주성분분석은 요인분석의 한 방법으로 각 요인들의 고유값과 분산을 이용하여 주성분의 수를 결정하고, 변수들 사이의 연관성에 기초하여 변수들을 새로운 성분으로 추출하여 변수특성을 구분한다(Suh et al. 2012). 지역별 생태계서비스 평가결과에 대한 주성분분석은 평가된 상관관계를 정량적으로 파악하며, 유사한 성격의 생태계서비스항목들을 파악하는데 용이하기 때문에 생태계서비스 번들과 함께 사용된다(Turner et al. 2014).

군집분석은 여러 대상들을 유사도가 높은 군집으

로 묶어서 분류하여 그룹들의 군집 특성과 그들 사이의 관계를 분석하는 방법이다(Song & Chang 2010). 군집분석은 생태계서비스 항목들의 평가결과를 이용하여 지역들을 유형화하고, 이를 기반으로 생태계서비스 항목들 사이의 연관성 파악에 필요한 기초정보를 제공한다(Sparke et al. 2017). 군집분석에는 유사성의 기준척도가 되는 거리산출 방법과 계층적 군집방법들이 다양하게 존재한다. 하지만 다양한 거리산출과 군집추출 방법들을 이용하여 추출된 군집분석의 결과를 통계적으로 검증하기 어렵다는 한계가 있다(Lee & Lee 2016). 이러한 문제는 다양한 방법들로 군집분석의 최적 군집개수를 산정한 뒤, 가장 발생빈도가 높은 군집의 개수를 선택하는 것으로 해결이 가능하다. R 소프트웨어의 NbClust패키지의 fviz_nbclust함수는 단일연결법, 완전연결법, 평균연결법, 와드법(ward), k-mean 등의 다양한 계층적 군집방법들을 반복적으로 수행하여 군집개수를 산정하고 계층적 군집분석 과정에 적용하여 최적 군집의 빈도수를 파악한다(Charrad et al. 2014). 이를 통해서 파악된 최적의 빈도수를 군집개수를 설정하고, 이에 해당하는 군집분석을 수행하여 경기도 시군별 생태계서비스 특성을 유형화하였다.

III. 결 과

1. 시군별 생태계서비스 평가

경기도 시군별 생태계서비스 평가결과를 살펴보면(Figure 1)과 같다. 공급서비스는 세부 서비스항목별로 분포특성이 다르게 나타난다. 작물생산과 가축생산은 경기도 남부와 연안에 위치한 시군에서 높게 나타난다. 반면 임산물생산은 과천에서 특수하게 높은 반면, 나머지 시군들은 모두 낮다. 수자원공급은 경기도 북동부에 위치한 시군에서 높지만 시군별 편차는 적게 나타난다. 조절서비스의 경우 항목별로 유사한 분포특성이 나타나는데, 전반적으로 산림비율이 높은 동북부 지자체에서 높고, 서남부에 위치한 지자체에서는 낮게 나타난다. 기후조절은 지역별 편차가 크지 않은 반면, 대기조절과 침식조절은 상대적으로 지역 간 편차가 크게 나타났다. 지지서비스의 경우

종다양성은 연안과 북부접경지역 지자체에서 높은 반면, 서식지는 조절서비스 항목들과 유사하게 북동부 지자체에서 높다. 문화서비스의 경우 여기는 서울에서 인접하고, 도시화 수준이 높은 시군들이 높은 반면 생태관광은 경기도 서쪽연안 도시들과 북쪽에 위치한 접경지역에 인접한 시군들에서 높다.

2. 시군별 생태계서비스 유형화 및 특성 비교

개별적인 생태계서비스 평가결과를 이용하여 제작된 생태계서비스 번들을 가나다순으로 정리하였다(Figure 2). 경기도 시군별 생태계서비스 번들 모형을 비교할 경우, 시군별로 생태계서비스 분포특성이 다양하게 나타났다. 안성과 평택과 같이 공급서비스가 높게 나타나는 시군에서는 조절서비스와 문화서비스가 낮고, 조절서비스가 높게 나타나는 가평과 양평은 공급과 문화서비스가 낮게 나타났다.

생태계서비스 번들을 이용하여 주성분분석을 수행하여 고유치(Eigen value)가 1이상인 3개 요인으로 생태계서비스들을 구분하였다. 주성분분석에서 나타난 생태계서비스 항목별 관계와 요인은 Figure 3(A)와 같으며, 인자별 적재량은 Table 2와 같다. 제 1인자는 조절서비스 항목들이 다른 서비스들과 구분되는 것으로 해석된다. 제 2인자는 식량생산과 가축생산이 다른 서비스들과 구분되는데, 이는 농촌에서 우세한 공급서비스들이 나타나는 것으로 해석된다. 반면 제 3인자는 산림생산, 생물다양성, 여가가 혼합되어 나타나기 때문에 생태계서비스 유형화 측면에서 해석이 어렵다. Figure 3(B)은 개별 시군들의 생태계서비스 특성별 유사성을 보여준다. 가평, 양평, 남양주, 동두천 등과 같이 경기도 외곽에 위치하며 산림비율이 높은 시군들이 생태계서비스 분포특성이 유사하게 나타난다. 또한 이천, 평택, 화성, 김포와 같이 산지비율이 낮고, 농경지가 높은 시군들이 유사하게 나타난다. 반면 과천은 다른 시군들과 구별되는 생태계서비스 특수형으로 나타난다.

Ward법을 이용하여 군집분석을 수행한 결과, 경기도 시군들을 4개의 유형으로 분류하였다(Figure 4). 군집 1은 '도시형'으로 주로 서울 주변에 위치한 15개의 시군들을 포함한다. 이들 시군들은 도시화율

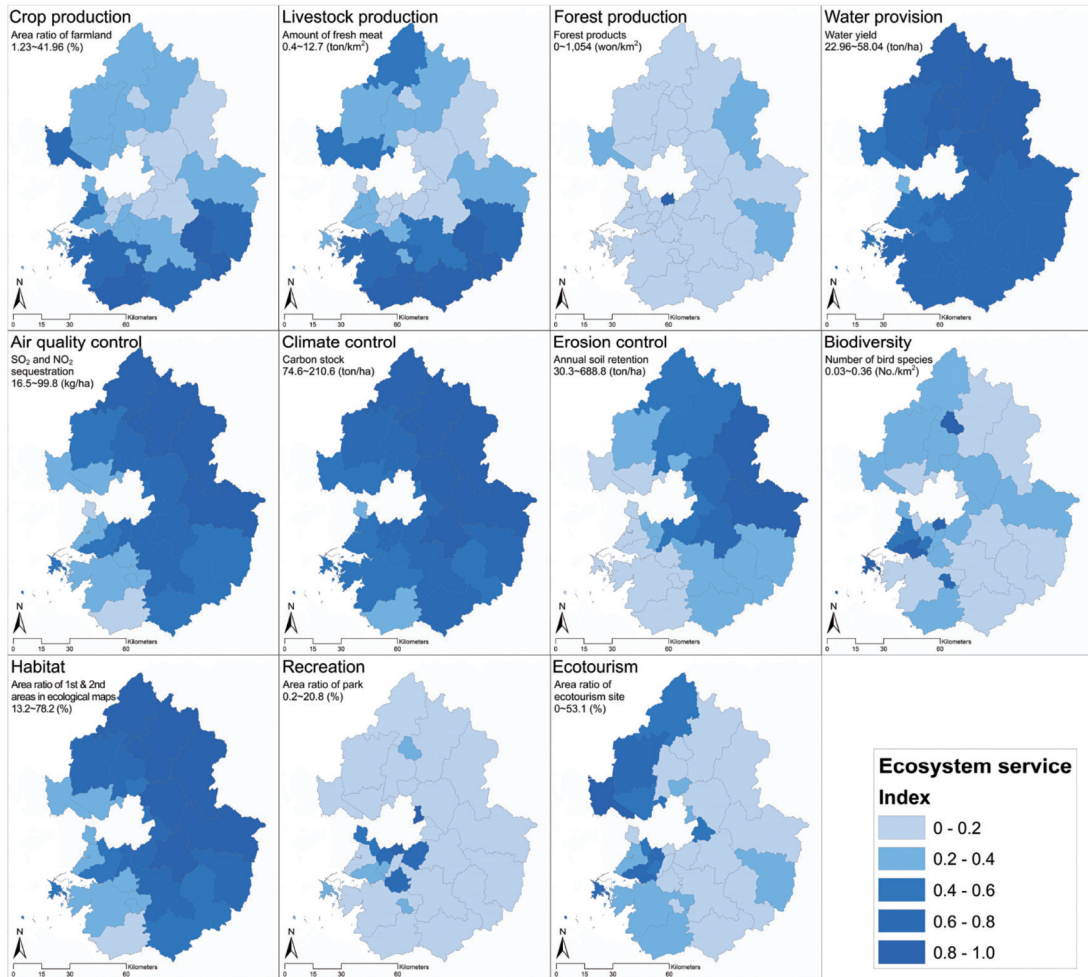


Figure 1. Results on each ecosystem service index of cities in Gyeonggi-do.

Table 2. Results on rotated component matrix from principal component analysis (P=Provision, R=Regulation, S=Supporting and C=Cultural services)

Variable	Factor 1 (46.3%)	Factor 2 (23.4%)	Factor 3 (11.9%)
(R) Climate regulation	0.97	-0.20	-0.01
(R) Air quality regulation	0.95	-0.27	0.01
(S) Habitat	0.94	-0.24	0.06
(R) Erosion regulation	0.89	-0.27	-0.06
(P) Water provision	0.86	0.27	-0.08
(P) Livestock production	-0.23	0.94	-0.09
(P) Crop production	-0.31	0.94	-0.12
(P) Forest production	0.10	0.00	0.88
(S) Biodiversity	-0.09	-0.17	0.75
(C) Recreation	-0.51	-0.56	0.49
(C) Ecotourism	-0.19	0.01	-0.07

이 높은 반면에 농지와 산림의 비율은 상대적으로 낮아 공급서비스와 조절서비스는 낮다. 도시 자체의 인구수도 많아 도시공원이 잘 조성되어 있지만, 생태

관광지 면적이 부족하여 전체적인 생태계서비스는 낮다. 군집 2는 과천시에 해당하는 특수형인 ‘도시산림형’으로 여가서비스와 산림생산이 다른 시군들에

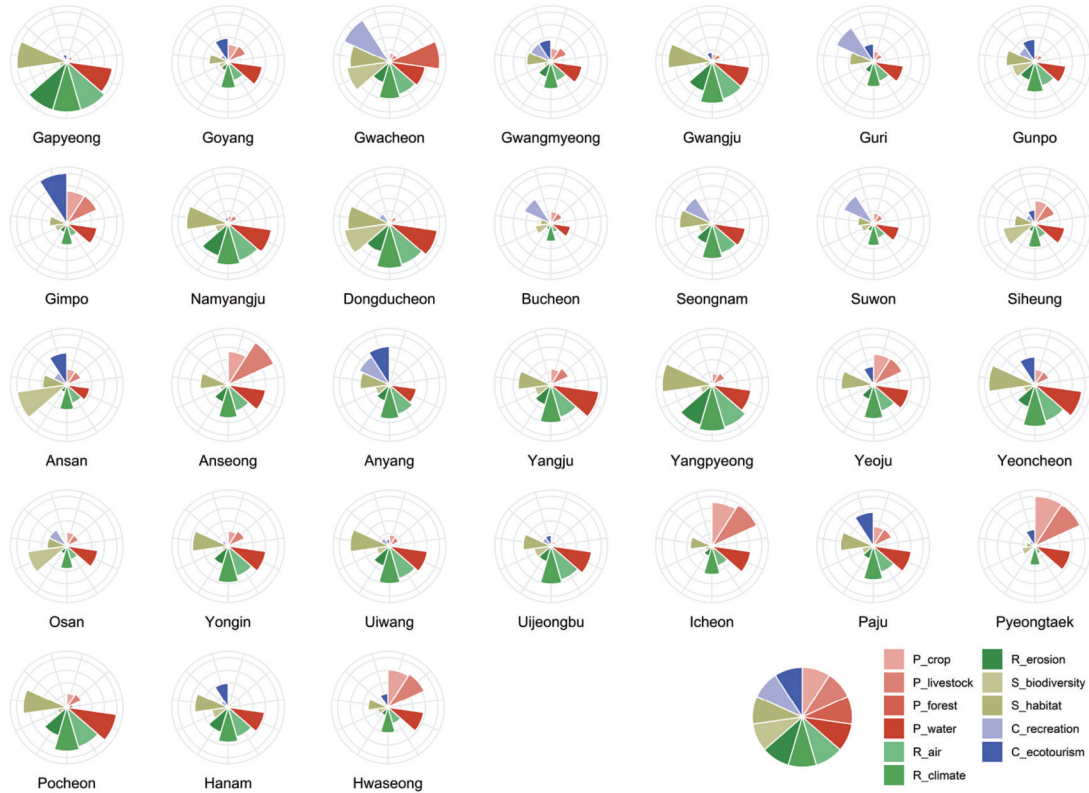


Figure 2. Ecosystem service bundles of cities in Gyeonggi-do arranged in Korean alphabetical order (Abbreviations are defined in Table 1).

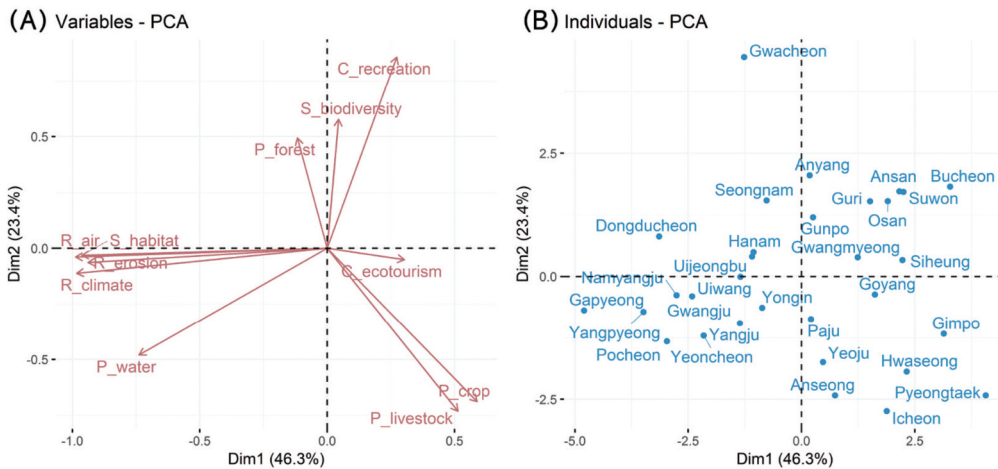


Figure 3. Result on first and second dimensions of principal component analysis among regional ecosystem services (Left: Graph of variables, Right: Graph of individuals).

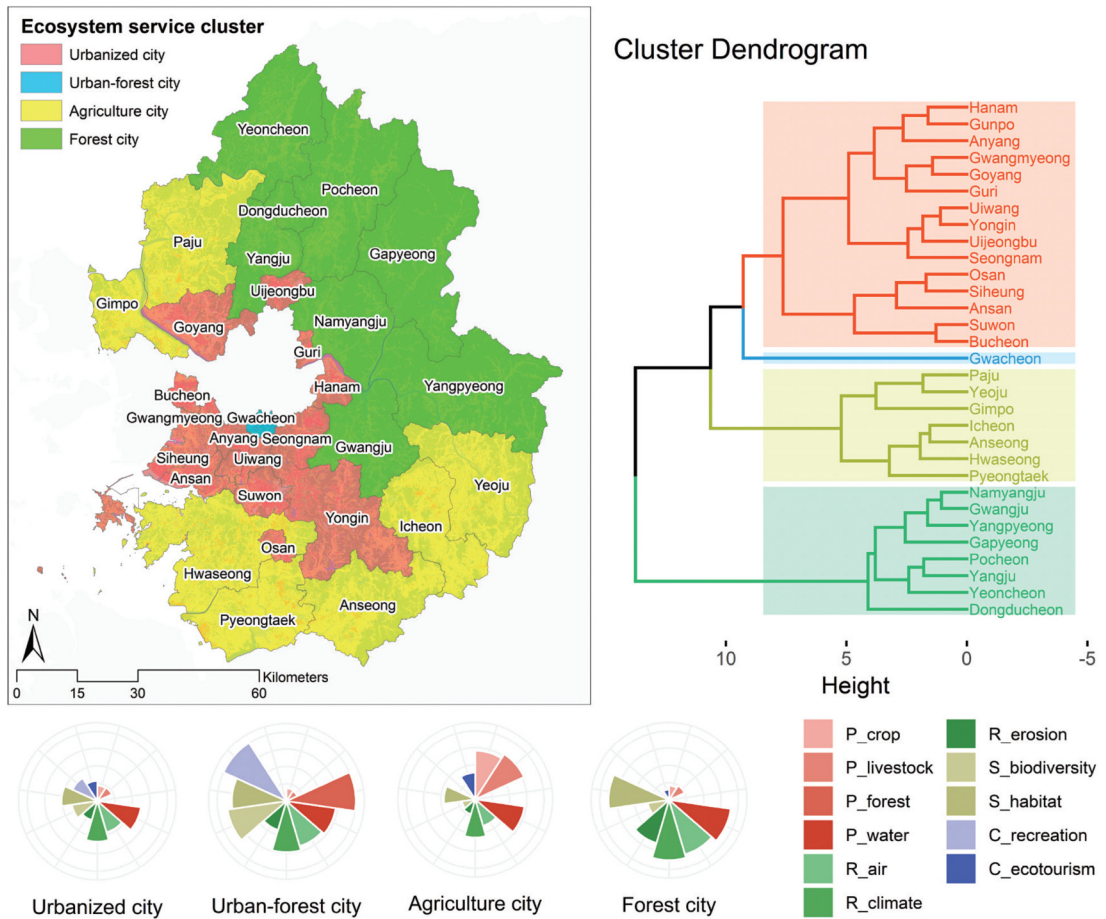


Figure 4. Results on cluster analysis and bundles of ecosystem services.

Table 3. Features of ecosystem service clusters and their land uses of cities in Gyeonggi-do

Cluster	Urbanized city	Urban-forest city	Agriculture city	Forest city
Ecosystem service features	Cultural services	Mixed services	Provision services	Regulation services
Description	① Located near Seoul, ② High proportion of urbanized area	① High proportion of forest with high urbanized area	① Located in south and northwestern part of the province, ② High proportion of agriculture area	① Located in northeastern part of the province, ② High proportion of forest and low urbanized area
Cities	Goyang, Gwangmyeong, Guri, Gunpo, Bucheon, Seongnam, Suwon, Siheung, Ansan, Anyang, Osan, Yongin, Uiwang, Uijeongbu, Hanam	Gwacheon	Gimpo, Anseong, Yeosu, Icheon, Paju, Pyeongtaek, Hwaseong	Gapyeong, Gwangju, Namyangju, Dongducheon, Yangju, Yangpyeong, Pocheon, Yangju, Yeoncheon, Dongducheon
Urban (%)	27.5%	15.9%	11.1%	6.9%
Agriculture (%)	13.9%	9.0%	34.9%	11.1%
Forest (%)	37.1%	55.6%	31.3%	66.8%

비해서 특별하게 높고, 나머지 서비스들은 도시형과 산림형의 중간수준으로 나타난다. 군집 3은 '농업형'으로 주로 경기도 남부와 북부의 7개 시군을 포함한다. 군집 3은 주로 농업지역이 넓게 나타나면서 공급서비스인 작물생산과 가축생산이 높고, 농경지의 저류기능으로 인하여 수자원공급도 높다. 반면 다른 조절서비스 항목들은 '도시형' 도시들과 유사한 수준에서 나타나며 여가서비스는 낮다. 군집 4는 '산림형'으로 경기도 북동부에 위치하는 8개 시군들이다. 이들은 다른 군집에 포함된 시군에 비해 도시화율이 낮고, 산림의 비율은 높은 지역으로 조절서비스 항목들과 지지서비스인 서식지의 값이 높다. 평지에서는 주로 농경지가 분포하기 때문에 일부 시군에서는 공급서비스도 나타나지만, 가축이나 임산물생산은 낮다. 산림이 넓게 분포하지만, 도시공원과 생태관광지는 면적대비 다소 낮다. 이와 같은 유형별 생태계서비스 특성과 토지이용특성을 정리하면 Table 3과 같다.

IV. 고찰

1. 경기도의 생태계서비스 분포특성

공급, 조절, 문화서비스가 우세한 유형들로 구분된 경기도 시군들의 생태계서비스 특성은 기존의 광역단위의 번들평가 연구들과 공통점을 가지며, 서비스 항목별 연관성도 유사하게 나타난다. 기존 연구에서 광역권내의 중심도시들은 문화서비스(여가, 생태교육 등)가 높게 나타나며, 외곽에 위치한 지자체들은 농지와 산림비율에 따라서 공급과 조절서비스 중심형으로 구분된다(Raudsepp-Hearne et al. 2010; Yang et al. 2015; Queiroz et al. 2015; Baro et al. 2017). 다만 많은 연구들에서 광역권이 대도시를 포함한 광역권을 대상으로 수행되어 핵심 중심도와 일부 주변 도시들만 도시형으로 구분된다. 반면 경기도는 도시형으로 구분되는 지자체들의 수가 15개로 가장 많은데, 이는 중심도시의 규모가 큰 대규모광역권 연구에서 유사하게 나타난다. Yang et al.(2015)에서 대도시형으로 분류된 상하이를 제외할 경우, 상하이 주변도시들은 도시형으로 분류되고, 외곽의 도시들은 산림형으로 구분된다. 경기도의 경우 서울 주변

지역에 위치한 시군들이 도시형으로 분류되며, 외곽 도시들은 농업도시형과 산림도시형으로 구분되었다. 이는 광역권의 규모와 지역적 특성에 따라서 도시형 군집의 수준이 달라지는 것으로 볼 수 있다.

또한 본 연구의 유형화 결과 과정에서 나타나는 생태계서비스 항목들간의 연관성도 기존의 연구결과들과 많은 유사성이 나타난다. 많은 연구들에서 조절서비스 항목들은 시너지를 가지는 것처럼(Lee and Lautenbach 2016), 본 연구에서도 조절서비스 항목들이 하나의 설명인자에 포함되는 시너지 관계가 나타났다. 반면 농업생산과 관련된 공급서비스인 작물생산과 가축생산의 상관관계가 연구에 따라서 다르기 때문에(Turner et al. 2014; Baro et al. 2017), 경기도시군의 농업도시형 군집의 특성은 일반적인 것으로 보기 어렵다. 그러므로 기존의 연구결과를 기준으로 지역유형들을 구분하기 보다는 실제 생태계서비스 평가결과를 이용하여 지역들을 유형화하고 이에 맞는 관리정책을 수립하는 것이 필요하다.

본 연구에서 사용된 지표와 지역적 특성으로 유형화 결과가 다르게 나타나기도 한다. Yang et al. (2015)에서도 해양생산을 생태계서비스 지표에 포함시키면서 다른 시군들과 차이점이 크게 나타나는 섬 도시 유형이 나타나는 것처럼, 본 연구에서도 임산물생산이 높은 과천이 다른 연구들과 구별된 특수형으로 분류되었다. 이와 같이 생태계서비스 시군별 유형화는 사용된 서비스 지표들과 숫자에 의해서 영향을 받기 때문에 연구별로 다른 결과가 나타난다.

2. 생태계서비스 번들의 활용

생태계서비스 분포특성은 지역의 토지이용에 의해서 결정되기 때문에(Sparke et al. 2017), 지역 생태계서비스 관리정책은 토지이용과 공간계획을 통해서 수행될 수 있다. 특히 지역의 생태계서비스 분포특성과 서비스별 상관관계를 파악하고, 이를 기반으로 토지이용과 공간계획을 수립하는 것은 효율적인 생태계서비스 관리에 기여한다(Raudsepp-Hearne et al. 2010).

광역수준에서는 시군별로 상이한 생태계서비스 특성을 고려하여 생태계서비스를 관리할 수 있다.

시군별로 강점을 보이는 서비스들은 우선적으로 관리하여 생태계서비스의 전체적인 양을 유지하고, 생태계서비스 공급의 임계점을 설정하여 시군별로 부족한 서비스들에 대한 증진정책을 수립할 수 있다 (Raudsepp-Hearne et al, 2010). 예를 들어 농업형으로 구분된 경기도 남쪽의 시군들을 공급서비스 우선 관리대상으로 선정하여, 공급서비스를 유지 및 증진하도록 관리한다. 반면 조절서비스가 낮은 도시형 시군들을 대상으로 임계점을 설정하여, 임계점 이하의 시군들을 대상으로 조절서비스를 증진시키기 위한 다양한 정책을 수립하는 것이다.

시군들에서는 광역단체에서 계획된 정책방향성을 고려하여 유사한 유형으로 분류된 시군들과 함께 생태계서비스를 관리하거나, 유사한 유형의 성공사례를 참고하여 생태계서비스의 공급량을 관리한다 (Yang et al, 2015). 도시형 그룹의 경우 도시인구가 많고 기존 개발지의 비율이 높기 때문에, 산림과 농경지의 확대가 어려워 공급서비스와 조절서비스를 급격하게 증대시키는데 한계가 있다. 이러한 지역들은 도시외곽의 산림과 농경지를 유지하는 동시에 도시녹지와 도시텃밭과 같은 공간들을 조성하여 공급 및 조절서비스를 유지하는 동시에 문화서비스 공간으로 활용하는 방향으로 정책을 수립할 수 있다. 산림형 도시들은 산지비율이 높기 때문에 조절서비스 항목들이 높고, 서식지와 수자원공급도 높다. 반면 수자원공급을 제외한 공급서비스와 문화서비스는 낮게 나타난다. 이들 도시들이 제공하는 조절서비스와 수자원공급은 수도권주민들의 생활에 매우 중요한 서비스들이며, 지역의 자연환경이 가지는 생태적 가치도 높기 때문에 기존의 생태계서비스들을 유지 및 관리하는 방향의 지역 환경정책이 필요하다.

본 연구의 결과를 효율적으로 활용하기 위해서는 주의가 필요하다. 선행연구들과 본 연구의 지표와 방법론이 다양함에도 불구하고, 유형화 결과는 유사하게 나타났다. 하지만, 생태계서비스 공간분포특성은 지표와 방법론에 따라 다르기 때문에 연구결과를 정책적으로 활용하기 위해서는 표준화된 평가지표와 방법론이 정립되어야 한다(Maes et al, 2012). 본 연구에 사용된 평가지표와 방법론들이 기존의 연구들

에서 검증 및 적용된 방법론을 적용하였지만, 수자원 공급 평가모형과 같이 실제적인 검증이 부족한 지표들도 존재한다. 그렇기 때문에 본 연구결과는 해당 생태계서비스항목에 대한 평가보다는 지역별 생태계서비스 특성을 파악하는데 의의가 있다. 그러므로 본 연구결과를 특정한 생태계서비스 관리에 사용하기 위해서는 특정한 생태계서비스 항목을 정확하게 평가하고, 대표성을 가질 수 있는 지표가 확립되어야 한다.

V. 결론

본 연구는 경기도 시군들의 생태계서비스를 평가하고, 이를 기반으로 생태계서비스 번들을 제작하고 시군들을 유형화하였다. 생태계서비스 평가결과 번들을 이용하여 주성분분석과 군집분석을 수행하여 생태계서비스 특성에 따라 경기도 시군들을 유형화하였다. 경기도 시군들은 생태계서비스 유형에 따라 도시형, 도시산림형, 농촌형, 산림형으로 구분되며, 주로 지역의 토지이용특성과 연관되어 나타났다. 또한 생태계서비스 항목들에 대한 주성분 분석 결과는 조절, 문화, 공급서비스 평가항목들이 대부분 서비스 유형에 따라 나타났으며, 이를 통해서 토지이용과 생태계서비스 유형간의 연관성도 파악되었다.

각각의 유형들은 인문사회 및 자연환경의 특성별로 차이를 보이며 공급하는 생태계서비스 번들형태도 다르게 나타난다. 생태계서비스 관리정책은 특정한 생태계서비스가 아니라 다양한 생태계서비스를 고려해야 하며, 그 과정에서 일부 서비스들은 상충관계가 발생하기 때문에 관리 우선순위를 결정할 때, 번들을 통한 특성파악은 유용하다. 경기도 전체 생태계서비스의 균형을 유지하고, 시군별로 장점을 가진 생태계서비스 관리정책을 수립하는데 도움이 된다. 다만 본 연구는 경기도의 행정구역 기준의 평가결과를 이용하여 수행된 연구이기 때문에, 연구범위의 공간스케일이 달라지거나 격자화된 평가결과를 이용하는 경우에 지역 유형화 결과와 생태계서비스 요인들이 달라질 수 있다. 생태계서비스 평가지표 선정도 특정 서비스의 전체적인 측면을 반영하기 보다는 평

가 및 자료의 이용가능성에 의해서 결정되었기 때문에 지표선정과 평가방법론의 고도화가 필요하다. 또한 생태계서비스 특성들이 지역의 토지이용과 같은 다양한 요인들과 연관성을 가지지만, 이들과 생태계서비스 상관관계를 정량적으로 파악하지 못한 부분도 개선이 필요하다. 향후 이러한 문제들이 해결되어 지역 생태계서비스의 분포와 특성을 현실적으로 파악할 수 있다면 지역의 환경공간정책과 생태계서비스 관리를 위한 의사결정에 중요하게 사용될 것이다.

사 사

본 연구는 국립생태원의 전략과제로 수행된 지역의 생태가치 평가 및 인식증진방안 연구사업(NIE-전략연구-2019-07)의 지원을 받아 수행되었음.

References

- Baro F, Gomez-Baggethun E, Haase D. 2017. Ecosystem service bundles along the urban-rural gradient: insights for landscape planning and management, *Ecosystem Services*. 24: 147-159.
- Bennett EM, Peterson GD, Gordon LJ. 2009. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*. 12(1): 1394-1404.
- Charrad M, Ghazzali N, Boiteau V, Niknafs A. 2014. NbClust: an R package for determining the relevant number of clusters in a data set. *Journal of Statistical Software*. 61(6): 1-36.
- Conte ME, Nelson E, Carney K, Fissore C, Nasser O, Plantinga AJ, Stanley B, Rickett T. 2011. Terrestrial carbon sequestration and storage. In: Kareiva P, Tallis H, Rickett T, Daily GC, Polasky S. *Natural capital: theory and practice of mapping ecosystem services*. New York: Oxford University Press: 111-128.
- Crouzat E, Mouchet M, Turkelboom F, Byczek C, Meersmans J, Berger F, Verkerk PJ, Lavorel S. 2015. Assessing bundles of ecosystem services from regional to landscape scale: insight from the French Alps. *Journal of Applied Ecology* 52: 1145-1155.
- Derkzen ML, van Teeffelen AA, Verburg PH. 2015. Quantifying urban ecosystem services based on high-resolution data of urban green space: an assessment for Rotterdam, the Netherlands. *Journal of Applied Ecology*. 52(4): 1020-1032.
- Egoh B, Drakou EG, Dunbar MB, Maes J, Willemen L. 2012. Indicators for mapping ecosystem services: a review. Luxembourg: European Commission, Joint Research Centre (JRC).
- Francesconi W, Srinivasan R, Perez-Minana E, Willcock SP. 2016. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model ecosystem services: a systematic review. *Journal of Hydrology*. 535: 625-636.
- Goldstein JH, Caldarone G, Duarte TK, Ennaanay D, Hannahs N, Mendoza G, Polasky S, Wolny S, Daily GC. 2012. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. P. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 109(19): 7565-7570.
- Hamann M, Biggs R, Reyers B. 2015. Mapping social-ecological systems: identifying 'green-loop' and 'red-loop' dynamics based on characteristic bundles of ecosystem service use. *Global Environmental Change*. 34: 218-226.
- Hutcheson W, Hoagland P, Jin D. 2018. Valuing environmental education as a cultural ecosystem service at Hudson River Park.

- Ecosystem Services. 31: 387-394.
- KFRI. 2017. The lungs of the city, urban forests, Seoul: KFRI. [Korean Literature]
- Kim YJ, Gal BS, Park JB, Kim SH, Im TH. 2018. Classification of Nakdong river tributaries under priority management based on their characteristics and water quality index. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*. 40(2): 73-81. [Korean Literature]
- Lee DY, Lee HY. 2016. Regional classification and analysis of the characteristics suburban rural areas in the capital region for promoting area-specific policies. *Journal of the KRSA*. 32(2): 15-29. [Korean Literature]
- Lee H, Lautenbach S. 2016. A quantitative review of relationships between ecosystem services. *Ecological Indicators* 66: 340-351.
- Millenium Ecosystem Assessment. 2005. Millenium ecosystem assessment synthesis report, Washington DC: Island press.
- Maes J, Egoh B, Willemen L, Liqueette C, Vihervaara P, Schagner JP, Grizzetti B, Drakou EG, La Notte A, Zulian G, Bouraoui F, Paracchini ML, Braat L, Bidoglio G. 2012. Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. *Ecosystem Services*. 1: 31-39.
- NIE. 2017. Mapping and assessment of ecosystem services, Seocheon: NIE. [Korean Literature]
- NIE. 2018. A study on the evaluation and awareness of local ecological value, Seocheon: NIE. [Korean Literature]
- Niemela J, Saarela SR, Soderman T, Kopperoinen L, Yli-Pelkonen V, Vare S, Kotze J. 2010. Using the ecosystem service approach for better planning and conservation of urban green spaces: a Finland case study. *Biodiversity and Conservation*. 19(11): 3225-3243.
- Park IH, Kim YH, Cho KJ. 2012. Bird species diversity analysis according to the type of forest vegetation. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*. 15(6): 43-52. [Korean Literature]
- Queiroz C, Meacham M, Richter K, Norstrom AV, Andersson E, Norberg J, Peterson G. 2015. Mapping bundles of ecosystem services reveals distinct types of multifunctionality within a Swedish landscape. *Ambio*. 44: s89-s101.
- Raudsepp-Hearne C, Peterson GD, Bennett M. 2010. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 107(11): 5242-5247.
- Reyers B, Biggs R, Cumming GS, Elmqvist T, Hejnowicz AP. 2013. Getting the measure of ecosystem services: a social-ecological approach. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 11: 268-273.
- Risal A, Bhattarai R, Kim D, Park Y, Yang J, Lim K. 2016. Application of Web ERosivity Module (WERM) for estimation of annual and monthly R factor in Korea. *Catena*. 147: 225-237.
- Rho PH, Choung EL. 2006. Alternatives of the Korean Nationwide Survey on Natural Environments to Promote Biodiversity Conservation. *Journal of Environmental Policy*. 5(3): 25-56. [Korean Literature]
- Roh YH, Kim CK, Hong HJ. 2016. Time-series changes to ecosystem regulating services in Jeju: focusing on estimating carbon sequestration and evaluating economic feasibility. *Journal of Environmental Policy*. 24(2): 29-44. [Korean Literature]

- Satz D, Gould RK, Chan KMA, Guerry A, Norton B, Satterfield T, Halpern BS, Levine J, Woodside U, Hannahs N, Basurto X, Klain S. 2013. The challenges of incorporating cultural ecosystem services into environmental assessment. *Ambio*. 42: 675-684.
- Song CH, Lee WK, Choi HA, Jeon SW, Kim JU, Kim JS, Kim JT. 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. [Korean Literature]
- Song MK, Chang H. 2010. Characterization of cities in Seoul metropolitan area by cluster analysis. *Journal of Korean Society for Geospatial Information System*. 18(1): 83-88. [Korean Literature]
- Sparke R, Lasseur R, Crouzat E, Bullock JM, Lavorel S, Parks KE, Schaafsma M, Bennett EM, Maes J, Mulligan M, Mouchet M, Peterson GD, Schulp CJE, Thuiller W, Turner MG, Verburg PH, Eigenbord F. 2017. Unpacking ecosystem service bundles: towards predictive mapping of synergies and trade-offs between ecosystem services. *Global Environmental Change* 47: 37-50.
- Suh K, Kim TG, Lee JM, Lee JJ. 2012. Effective classification framework design and implementation for rural regional information using principal component analysis and cluster analysis. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 54(1): 73-81. [Korean Literature]
- Turner KG, Odgaard MV, Bøcher PK, Dalgaard T, Svenning JC. 2014. Bundling ecosystem services in Denmark: trade-offs and synergies in a cultural landscape. *Landscape and Urban Planning*. 125: 89-104.
- Verner J, Morison ML, Ralph CJ. 1986. *Wildlife 2000: Modeling habitat relationships of terrestrial vertebrates*. Madison Wisconsin: University of Wisconsin press.
- Yang G, Ge Y, Xue H, Yang W, Shi Y, Peng C, Du Y, Fan X, Ren Y, Chang J. 2015. Using ecosystem service bundles to detect trade-offs and synergies across urban-rural complexes. *Landscape and Urban Planning*. 136: 110-121.