

Research Paper

InVEST모형을 이용한 생태계서비스의 가치 평가 - 구상나무 분포지를 대상으로 -

최지영 · 이상돈

이화여자대학교 환경공학과

Evaluation of Ecosystem Service for Distribution of Korean fir using InVEST Model

Jiyoung Choi · Sangdon Lee

Dept. of Environmental Science and Engineering, Ewha University

요약 : 본 연구는 구상나무(*Abies koreana*) 분포지를 대상으로 AHP (Analytic Hierarchy Process) 기법을 적용한 InVEST모형을 사용하여 서식처 질 분석과 탄소고정량 추정을 통한 경제적 가치 평가를 하였다. 구상나무는 국내 고유종으로 장차 국가의 생물 주권 확립에 따라 핵심요소로 작용하고 있음에 따라 구상나무의 보존을 위해 연구대상지를 구상나무의 분포지인 한라산, 지리산, 소백산국립공원으로 선정하였다. InVEST모형 선행연구에서 시사한 한계점인 국내 입력자료가 없어 해외문헌의 값을 차용하여 정확성이 떨어지는 부분을 보완하기 위해 AHP기법을 적용하여 입력자료로 하였으며, 시나리오 분석을 위해 1980, 1990, 2000년을 기준으로 모델링을 하였다.

결과는 한라산국립공원이 가장 큰 서식처 질의 변화양상을 보였으며, 1980년은 0.96 ± 0.14 , 1990년은 0.97 ± 0.14 , 2000년은 0.94 ± 0.17 로 감소하는 것으로 도출되었다. 소백산국립공원의 구상나무의 분포지인 아고산지대의 변화가 가장 큰 곳으로, 서식처 질은 0.98, 0.98, 0.97로 감소하였다. 연구대상지 중 지리산국립공원의 서식처 질은 0.98, 0.99, 0.99로 가장 잘 보존된 곳으로 도출되었다. 그리고 경제적 가치 환산 결과, 한라산은 1,928만 달러 손실, 소백산은 803만 달러 손실로 추정되었다.

결과적으로 국내 고유종인 구상나무가 제공하는 생태계서비스의 서식처 질과 경제적 가치추정을 통해 정량적인 값을 도출하였다. 생태계서비스 모델로 특정지역의 서식처 질 분석을 통한 정성적인 변화와 경제적 가치 환산을 통한 정량적인 값의 제시가 가능함을 확인할 수 있었다. 생태계서비스의 가치를 평가를 통해 보존지역의 개발과 같은 외부요인으로부터의 변화예측을 통한 객관적인 평가로 지속가능한 자연자원의 이용과 생태계 보전을 증진하는 방향으로 유도할 수 있는 방안으로 적용이 가능하다고 사료된다.

주요어 : 생물다양성, 생태계서비스, InVEST model, 고유종, 구상나무

First Author: Jiyoung Choi, Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University, Seoul, South Korea. Tel: +82-2-3277-3565. E-mail: jiyongchoi1310@gmail.com

Corresponding Author: Sangdon Lee, Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University, Seoul, South Korea. Tel: +82-2-3277-3545. E-mail: lsd@ewha.ac.kr

Received: 22 December, 2017. Revised: 19 February, 2018. Accepted: 19 February, 2018.

Abstract : The present study was conducted to analyze the quality of the habitats of *Abies koreana* WILS. by using the InVEST model based on the analytic hierarchy process (AHP) technique and to evaluate the economic value by estimating the carbon fixation. *Abies koreana* WILS., an original biological species of South Korea, may be an essential element in establishing the national biological sovereignty in the future. The subjects of the present study were the national parks in Mt. Halla, Mt. Jiri, and Mt. Sobaek, which are the habitats of *Abies koreana* WILS. As suggested by previous studies as a limitation of the InVEST model, the utilization of the data from relevant international publications as the input data, due to the lack of the domestic input data, may decrease the accuracy of the modeling. Therefore, the AHP technique was applied for the input data. The modeling was performed with reference to the years of 1980, 1990, and 2000 for the scenario analysis.

The result of the modeling showed that the habitat quality was changed most in the national park in Mt. Halla, as the habitat quality score was decreased from 0.96 in 1980 to 0.97 in 1990 and 0.94 in 2000. In the national part of Mt. Sobaek, the habitat quality was changed most in the sub-alpine zone, as the habitat quality score was decreased from 0.98 in 1980 and 0.98 in 1990 to 0.97 in 2000. The habitat quality was best conserved in the national part in Mt. Jiri, as the habitat quality score was 0.98 in 1980, 0.99 in 1990, and 0.99 in 2000. The estimated economic loss by the change of the habitat quality was 19,280,000 USD for Mt. Halla and 8,030,000 USD for Mt. Sobaek.

In the present study, the habitat quality of the *Abies koreana* WILS, the original species of South Korea, was evaluated and the economic value of the ecological services provided by the habitats was estimated quantitatively. The result showed that the ecosystem service model may be used to qualitatively analyze the quality of a habitat located in a specific region and to estimate the economic value quantitatively. The objective evaluation of ecosystem services demonstrated in the present study may be applied to promote sustainable utilization of natural resources and conservation of the ecosystem by predicting the changes that may be caused by external factors including the development of preservation areas.

Keywords : Biodiversity, Ecosystem service, InVEST model, Endemic species, *Abies koreana*

I. 서론

생물다양성협약(CBD : Convention on Biological Diversity)은 1993년에 발효되어 생물다양성 보전, 구성요소의 지속가능한 이용 그리고 유전자원 이용으로 발생하는 이익의 공정한 분배를 목적으로 하고 있다(MA 2005). 생물다양성은 직접적으로 생물로부터 얻는 자원과 희귀종의 보존 측면뿐만 아니라 생태계서비스 제공 측면에서도 중요한 부분으로 생태계 복원력에 기본적인 요소로 작용한다(Geijzendorffer & Roche 2013; Fischer et al, 2006). 이처럼 생물다양성은 중요하게 인식되고 있어 국가 및 지역 개발정책 수립에서 생물다양성을 지표로 사용하여 중요한 자료로 고려되고 있다(Costanza et al. 1997; de Groot

et al. 2002; MA 2005). 그리고 2010년 생물다양성 보전을 위한 인센티브 제도를 구축하기 위해 CBD의 세 번째 목표로 '생물자원 이용 및 접근(ABS : Access to Genetic Resources and Benefit Sharing)'에 관한 국제적 규범을 명시하는 나고야 의정서가 채택되었다. 이는 생물자원에 대한 권리를 해당국가 주권이 인정하여 이익을 공유하는 것으로 각 국가의 고유종을 보호하기 위해 채택되었으며, 본 의정서 이행으로 국제적으로 생물주권 강화, 생물다양성 보전, 그리고 고유종 보호의 중요성이 높아짐에 따라 각 국가의 자원 확보 경쟁이 심화되고 있다(National Institute of Biological Resources 2011; Min et al, 2013).

이에 따라 자연자원이 제공하는 생태계서비스에

관한 연구의 필요성이 높아지고 있으며, 지속가능한 자연자원의 제고를 위해 이를 평가하는 기법들이 연구되고 있다. 국외 생태계서비스 연구는 1990년대부터 시작하여 최근에는 이를 국가 및 지역의 개발단계에서 경제적 지표로 사용하고 있다(MA 2005; TEEB 2010). 최근 연구동향으로는 생물다양성 밀집 지역에 대해 생태계서비스를 평가하거나(Duarte et al. 2016), 고유종에 대해 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Service and Tradeoff)모형을 중첩 분석하여 고유종의 경제적 가치를 평가하는 논문들이 있다(Bhagate et al. 2014; Terrado et al. 2016).

국내 생태계서비스 관련 연구는 2000년대부터 시작하여 국외에 비해 최근에 연구가 진행되고 있다. 개발이 되고 있는 특정지역에 대해 InVEST모형 중 Habitat Quality모형을 사용하여 서식처의 질을 분석하고, 시나리오 분석이 가능한 점을 시사한 논문과(Kim et al. 2015), 생태계서비스의 다양한 가치평가 기법들을 비교하여 이 중 InVEST모형을 이용한 생태계서비스 평가가 국내에 적용 가능성이 높은 도구임을 제시한 연구들이 있었다(Ryu & Lee 2013; Kim et al. 2015, Lee et al. 2015; Song et al. 2015). 위 선행연구들에서 공통적으로 시사하고 있는 한계점으로 국내를 대상으로 InVEST모형 구동 시, 입력자료 구축과정에서 국내에 맞는 평가지표가 없어 해외연구의 자료를 이용하여 정확성면에서 한계점을 갖고 있다고 하였다(Kim et al. 2015; Anh et al. 2015).

따라서 본 연구는 생물다양성 보전을 위해 국내 고유종인 구상나무를 연구대상으로 하여 연구대상에 맞는 평가지표를 선정할 수 있는 방법인 AHP(Analytic Hierarchy Process)기법을 적용한 InVEST모형을 통해 생태계서비스 평가를 하고자 한다. 국내 구상나무의 분포지에 대한 서식처 질 분석을 통한 정성적인 분석과 시간의 흐름에 따른 탄소고정량 추정을 통한 경제적 가치를 도출하여 생태계서비스의 정량적인 증·감 값을 제시하였으며, 이를 통해 자연자원의 지속가능한 제고와 한국의 생물다양성 보전을 위한 고유종과 그의 분포지에 대한 정량적인 생태계서비스 측정에 목적을 두었다.

II. 연구대상 및 연구방법

1. 연구대상

우리나라 고유종인 구상나무(*Abies koreana*)는 국내에서만 자연적으로 자라는 특산 식물이다. 한라산, 지리산, 덕유산, 소백산 등의 국립공원에서 제한적으로 분포하며, 해발 1,100m이상의 고산지대에 생육하는 대표적 아고산대 상록침엽수로, 세계자연보전연맹(IUCN)이 선정한 멸종위기종이다. 군락 단위의 분포지는 한라산과 지리산이며, 특히 한라산에는 군락을 형성하는 범위가 세계에서 유일한 구상나무림이 분포한다(Kim & Lee 2013). 이런 구상나무는 우리나라 고유 식물 중 해외에서 가장 많이 수요되고 있어 고가에 유통되고 있으며, 해외에서 우량 원예품종으로 개발돼 유통되고 있는 고유 식물 중 하나이다.

그러나 최근 수십 년에 걸쳐 주요 분포지인 한라산의 구상나무 군락이 고사하는 현상이 발생하고 있어 이를 규명하기 위해 꾸준히 연구가 지속되고 있다. 연구들에서는 지구온난화가 주된 원인으로 예측하고 있고, 이종침입, 해충이나 질병의 출현, 분포지 주변의 개발 등의 원인으로 해석되고 있다. 또한, 개체군의 크기가 매우 작기 때문에 진화가 불가능 하고 멸종될 가능성이 매우 높은 식물로 구분하고 있으며(Koo et al. 2001), 다른 고산수종에 비해 고사하는 개체가 많고, 상층에 비해 중·하층에서 우점도가 현저하게 줄어들어 점차 구상나무가 줄고 있어 대책이 시급하다고 보고되고 있다. 특히 한라산의 구상나무의 위성영상관련 논문에서는 1988년 175ha에서 2002년 117ha로 34%가 감소하였고(Kim & Lee 2013), 제주도는 고립되어 있어 변화에 민감하게 반응하고 있다. 기후변화뿐 아니라 개발과 관광유치로 인해 주변 생태계가 위협받고 있으며, 지리산 또한 설악산 케이블카 건설 반대에 대한 대안으로 설치지역 후보로 언급되고 있어, 우리나라 구상나무의 주요 분포지역들이 위협을 받고 있다.

현재 구상나무 자생지의 종 보전을 위해 국가에서 관리정책방향이 강구되고 있으며, 이러한 지속적인 고사의 원인을 찾기 위해 한국 고유 침엽수종의 보전 복원을 위해 보전 전략을 세우고 있다. 이에 따라 구

상나무림의 보존, 구상나무림의 고사원인에 대한 국내 선행연구들은 구상나무의 분포지, 생육현황, 지역별 생육현황의 비교와 같은 서식지 분포에 관한 연구가 되고 있으며(Kim & Chu 2000; Song et al. 2010; Kim & Lee 2013; Kong 2005), 최근에는 종 모델링이나 기후변화 시나리오를 통한 분포 미래 예측, 기후변화와 관련한 연구(Kim et al. 2015; Koo et al. 2001; Park et al. 2015; Koo et al. 2016; Kim & Oh 2016)로 예측에 관한 연구가 진행되고 있지만, 고유종인 구상나무가 제공하는 생태계서비스를 책정하는 분석은 연구가 전무하다.

따라서 본 연구에서는 자연적, 인위적으로 위협을 받고 있는 구상나무의 보존을 위해 이를 연구종으로 선정하였다. 생물다양성협약에서 고유종은 자국 내 특정 지역에서만 분포하는 생물종으로 정의하고 있기 때문에 그 나라의 국가 생물자원 중 가장 중요한 요소이고, 장차 국가 고유생물 주권 확립에 따라 핵심요소로 우선보호 및 관리 대상이 될 것이다(National Institute of Biological Resources 2013). 이에 따라 고유종 보호를 목표로 현재 구상나무의 지속적인

고사에 관하여 위협성 인지와 보호대책이 필요하며, 고유종이 제공하는 생태계서비스의 서식처 질의 증감과 이에 따른 가치추정을 통해 보다 객관적인 값을 제시하고자 한다. 구상나무의 보존을 위해 특별보존대책 연구가 필요함에 따라 구상나무의 분포지인 한라산국립공원, 지리산국립공원, 소백산국립공원으로 선정하였다(Figure 1).

2. 연구방법

1) InVEST model

InVEST모델은 미국 National Capital Project의 일환으로 스탠포드 대학, Natural Conservancy와 WWF(World Wildlife Funds)가 공동으로 개발한 모델이다. 자연자산과 경제적 상관관계를 파악하는데 적용되어 측정된 생태계서비스를 통해 정책 의사결정을 지원하기 위해 개발되었다(Sharp et al. 2015; Vigerstol & Aukema 2011). 전 세계적으로 각 국가에서 적용되는 모델로 현재 2017년까지 19가지의 생태계서비스 평가를 할 수 있다. 본 모델의 장점으로 시·공간적으로 유연한 구조로 시나리오 분석과 전 지

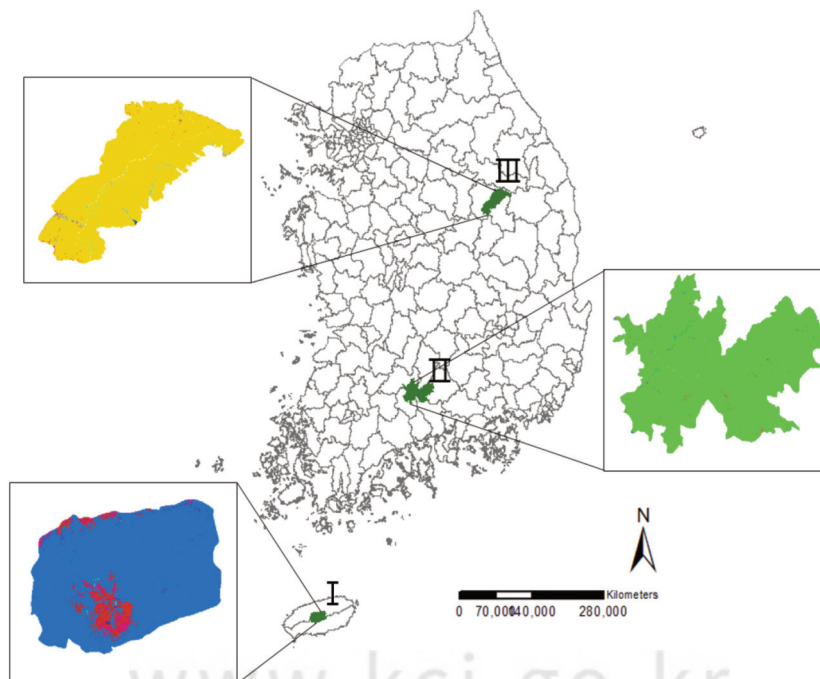


Figure 1. Study Area (I: Halla, II: Jiri, III: Sobaek).

Table 1. Input data and format of InVEST Habitat Quality model

Input Data	Format	References
Land cover map	Raster file	Arc GIS Map 10.3
Threats files	Raster file	
Threats data	Table (.csv)	AHP method
Sensitivity and habitat quality data	Table (.csv)	AHP method
Half saturation constant	Number (0.5)	Sharp et al. 2014; Lee et al. 2015; Seo 2015

구적, 국가적, 지역적 단위의 분석이 가능하며, 토지 피복을 기반으로 하여 입력자료 확보가 용이하며, 의사결정 과정에서 자연·환경적 가치를 고려할 수 있도록 개발되었다(Kim et al. 2015; Lee et al. 2015). 또한, InVEST모형 중 몇 개의 모형은 토지이용에 대한 객관적인 가치 판단을 위해 특정 상황에서 생태계 서비스의 변화 양상 추정이 가능하고 그 결과를 통한 경제적 가치 평가가 가능하다.

본 연구에서는 InVEST 3.3.3을 사용하였다. 이 중 서식처 질 분석은 Habitat Quality모형을 사용하였고, 탄소고정량 분석과 경제적 가치 평가 분석은 Carbon모형을 사용하였다.

2) InVEST Habitat Quality

InVEST Habitat Quality모형은 GIS를 이용한 토지피복도를 기반으로 선정된 위협요소와, 위협요소에 대한 최대영향거리, 각 요소들의 서식 적합성 지수, 토지피복별 민감요인 값을 입력자료로 하여 서식처의 파괴 정도 값을 계산하여 산정하는 방법이다.

본 모형을 적용하기 위해 연구대상지에 적합한 입력자료 구축을 위해 AHP기법을 사용하여 입력자료를 구축하였다. AHP분석을 통해 도출된 가중치를 입력계수로 사용하였다. AHP기법을 통해 인위적 위협요인으로 시가지 증가, 농경지 증가, 산림파편, 자연재해위험, 오염처리시설지역이 선정되었으며, 시가지증가와 농경지 증가는 토지피복도 자료에서 추출하였고, 산림파편은 도로와 나지의 면적으로 산출하였고, 도로자료는 한국교통연구원의 도로망 자료에서 추출하였고, 나지는 토지피복도 자료에서 추출하였다. 그리고 오염처리시설지역은 하수도처리장, 우수처리장, 폐수처리장, 정수장, 분뇨처리장, 폐기

물처리장, 매립장 등 환경기초시설의 경위도 좌표를 기반으로 공간자료로 구축하였고, 이는 국가수자원 관리종합시스템에서 자료를 받았다. 자연재해지역은 자연재해대책법에 근거하여 자연재해위험개선지구로 지정·관리되고 있거나 침수 실적이 있는 지역을 추출하였다. 모든 해당 공간분석은 Arc GIS Map 10.3을 사용하여 각 각의 요인은 모델 형식에 맞게 Raster형식으로 구축하였다. 그리고 추가적인 입력요소인 반포화상수는 선행논문들에서 제시된 0.5로 사용하였고, 접근성(Accessibility)은 제외하였다(Table 1).

3) InVEST Carbon model

InVEST Carbon모형은 시기별 토지피복도 자료와 피복별 탄소플 계수를 기반으로 추정된 탄소 고정량과 경제성 평가값을 구할 수 있으며, 특정 시기별 가치평가가 가능하여 과거, 현재, 미래의 차이를 알고자 하는 시기자료를 입력할 경우 탄소 고정량 변화와 이에 따른 경제적 가치 환산이 가능한 모델이다. 또한, GIS를 이용하여 탄소를 추정하는 다양한 방법론들인 VISIT, CBM-CFS3, Statistical Forest Growth Model 등을 비교한 선행논문(Choi et al. 2014)에서 위 방법론 중, InVEST모형을 이용한 탄소고정모형은 오차율이 적어 가용성이 높으며, 전 지구단위로 사용이 가능하여 용이성이 높은 모델로 국내 생태계서비스 평가에 적합한 계량모형으로 시사하고 있다. 탄소고정량 분석을 통한 경제적 가치평가는 InVEST Carbon 모델에서 탄소의 값과 적용대상 지역의 탄소할인율 값을 입력하면, 다음 식(1)을 탄소고정량 변화를 통한 경제적 가치평가를 할 수 있는 모델이다. 본 모델의 시간에 따른 탄소고정량에 대한

Table 2. Input data and format of InVEST Carbon model

Input Data	Format	References
Land cover map	Raster file	Arc GIS Map 10.3.3
Carbon table	Table (.csv)	Lee et al. 2015
Carbon price	Number (\$7.6)	EEX
Carbon discount rate	Number (5%)	Regulatory Reform Committee 2015

값의 수식을 통해서 모델을 통해 분석 값이 추정이 된다.

$$value_seq_x = V \frac{sequest_x}{yr_fut - yr_cur} \sum_{t=0}^{yr_fut - yr_cur - 1} \frac{1}{(1 + \frac{r}{100})^t (1 + \frac{c}{100})^t} \quad (1)$$

본 모델을 사용하기 위해서 1980, 1990, 2000년의 토지피복도와 탄소플 표를 구축하였다. Arc GIS Map10.3을 사용하여 각 시기별 토지피복도 파일을 구축하였고, 탄소플 표는 aboveground mass, belowground mass, soil, dead mass로 구성되어 있으며, 위 입력자료는 Natural Capital Project와 국내 선행논문에서 제시하고 있는 계수를 고려하여 구성하였다. 그리고 경제적 가치평가를 위한 추가적으로 필요한 2가지 입력계수인 국내 탄소가격은 교토의 정서를 채택한 EEX(European Energy Exchange)에서 제공하는 자료를 활용하였으며, EEX에서 구득이 가능한 이산화탄소 가격의 평균값인 7.6달러를 적용하였다. 그리고 탄소할인율은 2015년 행정규제 업무 기준 및 규제비용 총량제 시범사업 매뉴얼에서 제시된 우리나라 탄소할인율인 5%를 차용하여 적용하였다(Table 2). 위 입력자료와 계수들을 통해 InVEST Carbon 모델을 사용하여 연구대상지의 탄소고정량 추정하였고, 탄소변화량을 통한 시기별 경제적 가치평가를 시행하였다.

4) AHP기법

본 모델의 입력요인 선정과 서식처 값의 입력계수를 확보하기 위해 AHP기법을 이용하였다. AHP기법은 다수의 평가기준으로 구성되어 있을 경우, 중요도와 우선순위를 판단하기 쉽지 않을 때 체계적으로 평가할 수 있도록 해줌으로써 의사결정자의 복잡성을

해결해주는 장점을 갖고 있다(Heo et al, 2015; Song et al, 2008; Kang & Seo 2016). 의사결정의 계층 구조를 구성하고 있는 요소에 대해 전문가의 지식, 경험, 판단을 통해 가중치를 선정하는 방법으로 다양한 평가기준들의 중요성을 수치로 산출함으로써 신뢰성이 높은 분석결과를 도출해주는 기법이다(Lee 2001).

본 연구에서는 패널선정, 설문지 작성, 2차 설문 및 회수, 분석을 순서로 진행하였다. 패널선정은 최소 10명 이상의 패널이 필요하며 10~15명의 소집단의 전문가로도 의미있는 결과를 도출할 수 있어(Dalket 1969; Ewing 1991), 총 11명으로 전문가(연구기관 2인, 생태분야 연구원 9인)를 패널로 선정하였고, 1차로 개방형 설문을 통해 구상나무의 위협요인과 적합한 서식처 요인을 파악하였고, 2차에서는 1차에서 수집한 요인들에 대해 중요도 정도 측정은 리커트식 5점 척도를 사용하였다. 설문지 전달 및 회수방법은 전자우편을 통해서 하였다.

구상나무의 위협요인 선정과 적합한 서식처에 대한 요인을 발굴하고, 선정요인에 대한 가중치를 분석하였다. 타당도와 신뢰도가 낮은 요인을 제거하여 방해하는 문항을 제거하기 위해 SPSS 23버전을 사용하여 공통성으로 측정하여 0.4이상인 요인을 선정하였고, 신뢰도는 Cronbach의 알파값이 0.6이상인 것을 확인하였다. 두 번째 분석에서는 선정된 위협요인을 최종으로 도출하였다. 상·하위 분석으로 자연적 요인과 인위적 요인으로 구분하였다. 분석결과 자연적 요인으로는 중요도 순서로 기후변화(0.573), 경사도 변화(0.146), 고도 변화(0.105), 외래종 침입(0.062), 토양유실(0.062), 자체천이(0.051)로 분석되었다. 인위적 요인으로는 시가지증가(0.358), 농경지 증가(0.257), 산림파편(0.222), 재해위험(0.091),

오염처리시설(0.071)로 선정되었다. 따라서 본 연구에서는 서식처 질 분석의 인위적 요인은 위와 같이 5개의 요인으로 선정되었으며, 이 때 CI(Consistency Index)는 일치성 지수로 0.1이하면 설문의 답이 일치함을 의미하며, 0.059로 도출되어 일치함을 확인하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 서식처 질 평가

연구대상지역은 국립공원이라 주거지, 습지가 존재하지 않아 위협요인으로 선정한 시가지, 나지, 농업지역에 대해서는 토지피복도 대분류 자료에서 추출하였고, 위협요인 중 환경기초시설은 지리산국립

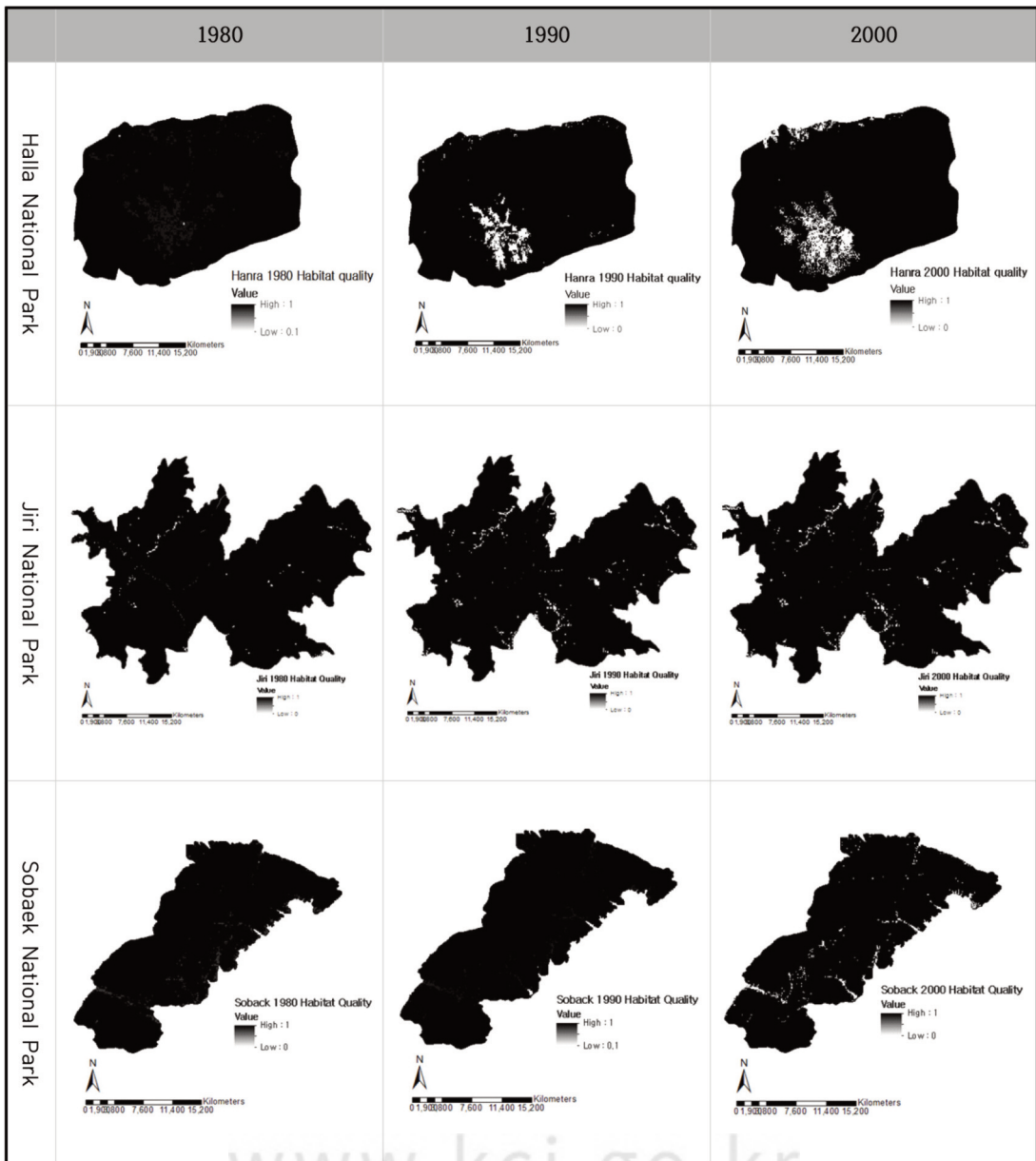


Figure 2. The results Map of Habitat Quality.

공원의 해당지역에 두 곳의 마을하수도가 위치하고 있어 위 지점을 적용하였다. 결과는 서식처 질 분석 지도에서 서식처 질이 높은 곳은 1, 낮은 곳은 0으로 도출되며 지도상으로 흰색부분이 될수록 서식처 질이 낮아지는 것으로 판단된다.

한라산국립공원의 서식처 질 평가 결과, 1980년의 한라산국립공원의 서식처 질 평균은 최소 0.1, 최대 값 1을 나타내며 0.96 ± 0.14 로 도출되었다. 1990년의 서식처 질 평균은 0.97 ± 0.14 이고, 2000년의 서식처 질 평균은 0.94 ± 0.17 로 분석되었다. 그리고 지리산국립공원의 서식처 질 평가 결과, 1980년의 지리산국립공원의 서식처 질 평균은 0.98 ± 0.09 , 1990년은 0.99 ± 0.07 , 그리고 2000년은 0.99 ± 0.47 로 분석되었다. 마지막으로 소백산국립공원의 서식처 질 평가 결과, 1980년의 소백산국립공원의 서식처 질 평균은 0.98 ± 0.11 , 1990년은 0.98 ± 0.08 , 2000년은 0.97 ± 0.97 로 분석되었다(Figure 2).

연구대상 3곳 중, 지리산국립공원이 가장 서식처 질이 높고 서식처 질이 잘 유지된 곳으로 판단되며, 한라산국립공원과 소백산국립공원은 서식처의 질이 각각 0.02, 0.01 만큼 감소하였다. 이는 연구대상지가 산림과 초지가 90% 이상인 곳으로 서식처 질의 결과만 본다면 자연적으로 우수한 지역으로 판단할 수 있지만, 시간흐름에 따라 산림이 초지, 시가지, 농업지로 대체되고 있음을 서식처 질 분석을 통해 서식처 질의 변화를 정성적으로 확인할 수 있었다. 특히 1990년과 2000년 사이에는 서식처 질이 감소함을 확인할 수 있었으며, 이를 탄소고정량 추정을 통

한 값으로 보다 정량적인 값을 볼 수 있을 것으로 판단된다.

2. 탄소고정량 추정과 경제적 가치 평가

1) 한라산국립공원

입력자료는 1980년, 1990년, 2000년에 대한 한라산국립공원의 토지피복도를 활용하였고, 추정된 탄소고정량의 결과이다(Figure 3). 1980년 토지피복도를 대상으로 한 탄소고정량은 약 3814934 Mg of C로 추정되었다. 이에 비해 1990년의 탄소고정량의 경우 약 3889640 Mg of C로 1.92% 만큼 증가되었고, 2000년의 경우 다시 3753244.25 Mg of C로 -3.63% 만큼 감소한 것으로 도출되었다.

본 추정지도는 선행연구(Kim & Lee 2013)와 같이 한라산 정상 능선부에 분포하는 것과 상충하여 시간흐름에 따라 한라산 정상을 중심으로 색이 열어지는 것으로 확인할 수 있었으며, 이에 따라 구상나무 분포지의 탄소고정량이 감소한 것으로 판단된다. 위와 같이 탄소고정량 추정 결과는 토지피복도를 기반으로 추정된 것이어서 토지피복의 시계열적 변화와 관련하여 해석이 된다. 1980년에서 1990년에는 탄소고정량이 높은 산지가 감소하고 초지가 증가하는 패턴을 보이고 있어 총 탄소고정량은 증가하였지만, 이와 달리 1990년에서 2000년 사이는 산지의 면적이 감소하고, 감소한 산지는 나대지와 초지지역으로 23%, 4%로 증가하여 대체되고 있는 것으로 판단되며, 또한 한라산 주변부는 농업지역 면적이 3% 증가함에 따라 총 탄소고정량이 감소하는 경향을 나타낸 원인으로 해석된다.

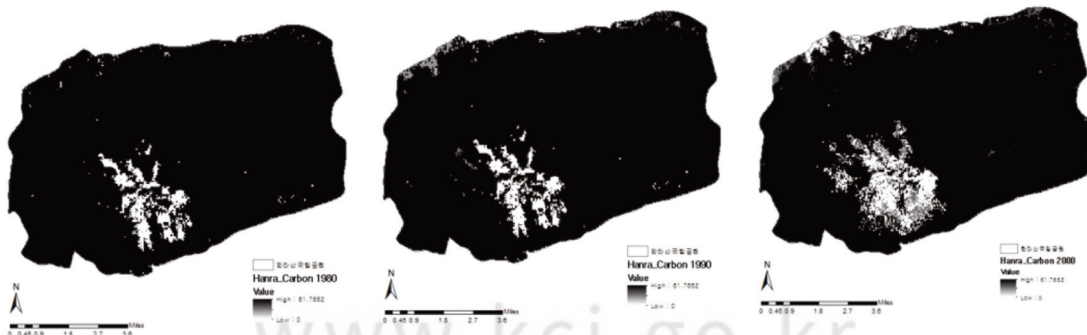


Figure 3. The Result Map of Carbon Fixation of Halla National Park (From left 1980, 1990, 2000 year).

2) 지리산국립공원

1980년 탄소고정량은 12041126 Mg of C, 1990년 탄소고정량은 12111716 Mg of C, 그리고 2000년 탄소고정량은 12159705 Mg of C으로 지리산의 탄소고정량은 증가하는 것으로 도출되었다(Figure 4). 토지피복도의 변화 확인 결과 1980년에서 1990년 사이에 지리산국립공원 북서쪽에 요천이라는 하천이 생기면서 수역의 면적이 증가하였고, 한라산국립공원의 산림은 나대지로 대체되고 있는 것과 달리 지리산국립공원의 산림은 초지로 대체되고 있었고, 초지의 면적이 0.27% 증가하여 총 탄소고정량을 증가하게 한 요인으로 해석된다.

3) 소백산국립공원

1980년의 탄소고정량은 8551148 Mg of C, 1990년의 탄소고정량은 8650386 Mg of C, 그리고 2000

년의 탄소고정량은 8579708 Mg of C로 추정되었다. 소백산국립공원은 1990년에서 2000년 사이에 연구대상지역 3곳 중에서 탄소고정량이 면적대비 가장 큰 폭으로 감소하는 지역이었다. Figure 5와 같이 탄소고정량이 낮음을 나타내는 흰색부분이 점점 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 구상나무의 분포지인 고도가 높은 곳인 소백산(1,439m), 형제봉(1,178m)과 마대산(1,052m)이 있는 소백산 중심부의 능선을 따라 흰색의 비율이 증가하는 것을 시각적으로 볼 수 있다.

대상지역의 토지피복도 변화 비율을 확인한 결과, 1990년에서 2000년 사이 시가지지역과 농경지지역이 각각 0.02%, 1.4%로 증가하여, 산림의 면적이 시가지와 농경지로 대체됨을 확인할 수 있었고, 또한 산림의 면적이 약 1.1%만큼 감소하였기 때문에 탄소고정량이 큰 폭으로 감소한 것으로 판단된다.

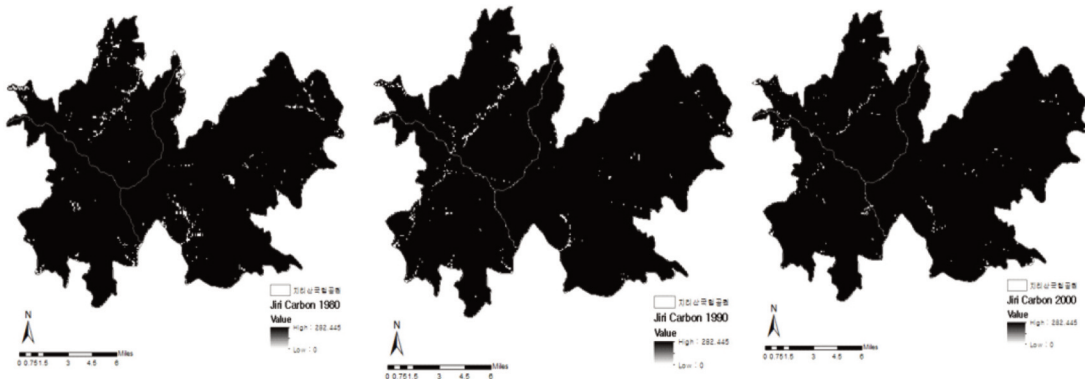


Figure 4. The Result Map of Carbon Fixation of Jiri National Park (From left 1980, 1990, 2000 year).

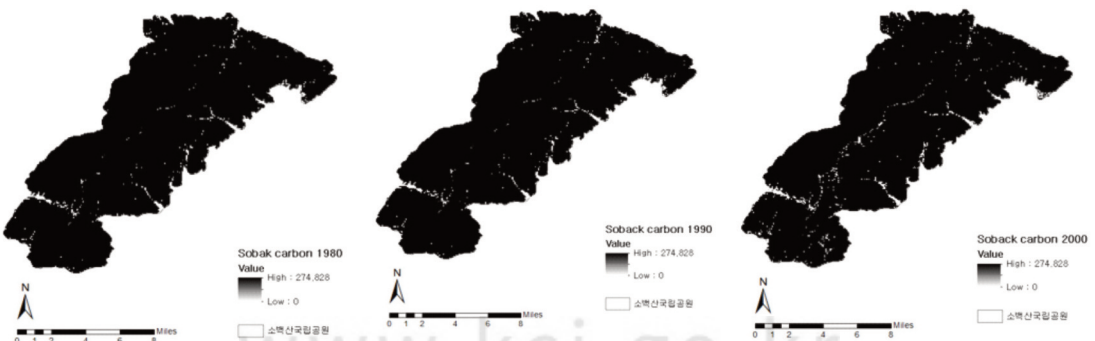


Figure 5. The Result Map of Carbon Fixation of Sobak National Park (From left 1980, 1990, 2000 year)

Table 3. Assessment of Economic Value in Research Period

Area	Year	1980~1990		1990~2000	
		Change (Mg of C)	Value estimation (\$)	Change (Mg of C)	Value estimation (\$)
Halla National Park		74706.16	460336.16	-136395.61	-19284772.00
Jiri National Park		93878.48	578474.00	32567.78	4604710.00
Sobaek National Park		88856.59	547529.31	-56779.49	-8027967.50

4) 시기별 경제적 가치 환산

연구대상의 1980년, 1990년, 2000년에 따른 탄소 고정량 변화량과 이에 따른 가치추정량의 결과를 나타내는 표(Table 3)이다. 1980년에서 1990년 사이의 한라산, 지리산, 소백산국립공원 순으로 탄소고정량은 약 7만, 9만, 8만 Mg of C으로 증가하였다. 따라서 이 기간의 탄소고정량 증가에 따른 가치 환산 시, 약 46만 달러, 58만 달러, 55만 달러로 추산되었다. 그리고 1990년에서 2000년 사이의 한라산의 탄소고정량은 약 14만 Mg of C로 감소하여 이 지역의 생태계서비스는 1,928만 달러 손실이 발생되었고, 지리산은 초지면적의 대체로 탄소량이 약 3만 Mg of C로 증가하여 460만 달러 증가되었지만, 녹지증가량은 전 10년도인 1980-90년과 비교하면 38% 감소하고 있었다. 그리고 소백산의 경우 약 6만 Mg of C의 탄소고정량의 감소로 인하여 이 지역의 생태계서비스는 약 803만 달러 손실된 것으로 추산된다.

IV. 결론

본 연구는 InVEST모형을 사용하여 국내 구상나무의 분포지 대상으로 1980년, 1990년, 2000년의 기간에 대해 서식처 질과 탄소고정량 분석을 통한 경제적 가치 환산 평가를 하였다. 서식처 질과 탄소고정량 분석에서 3곳 중, 한라산국립공원의 서식처 질의 변화와 탄소고정량이 크게 감소하는 곳으로 확인되었으며, 탄소고정량 감소에 따른 가치 추정은 1,928만 달러의 생태계서비스의 경제적 손실을 나타냈다. 이의 원인은 선행 구상나무의 분포변화 선행연구들과 동일하게 한라산의 구상나무가 사라지는 부분은 초지와 나대지로 대체되고 있음을 본 결과에서 토지피복도를 통한 시계열적 탄소고정량으로 확인할 수 있

었다.

서식처 질이 가장 잘 유지되고 있는 곳은 지리산국립공원으로 확인되었으며, 탄소고정량 증가와 서식처 질의 보존이 지속적으로 유지되어 이의 경제적 가치는 460만 달러 증가로 도출되었지만, 시간흐름에 따라 산림이 초지로 대체되고 있어 증가량은 큰 폭으로 감소되고 있었다. 그리고 소백산국립공원은 탄소고정량 추정지도를 통해 구상나무의 분포지인 해발이 높은 곳에 변화가 가장 큰 곳으로 도출되어, 관리가 필요한 곳으로 판단된다.

결과적으로 자연자원이 제공하는 생태계서비스의 가치평가가 가능하고, 이를 통해 발생하는 편익을 증·감 값을 통해 도출할 수 있었다. 이는 연구지역의 개발과 보전, 그리고 보전계획에 대한 방안으로 연계할 수 있다고 판단된다.

그리고 InVEST모형을 사용하여 개발계획에 대한 생태계서비스의 가치를 평가함으로써, 보전지역의 개발과 같은 외부요인에 대한 변화양상에 대한 예측을 통해 보다 객관적인 평가가 가능하여, 지속가능한 자연자원의 이용과 생태계 보전을 증진하는 방향으로 유도할 수 있는 방안으로 적용이 가능하다고 사료된다.

사사

본 논문은 정부(환경부)의 재원으로 국립생물자원관의 지원을 받아 수행하였습니다(NIBR201722201). 「생물다양성 및 경제학 관련 전문가 양성(4차년도)」, 최지영, “InVEST모형을 이용한 생태계서비스의 가치 평가 -구상나무 분포지를 대상으로-” 303면-338면, 국립생물자원관, 2017.12

References

- Bhagabati NK, Ricketts T, Sulistyawan TBS, Conte M, Ennaanay D, Hadian O, Wolny S. 2014. Ecosystem services reinforce Sumatran tiger conservation in land use plans. *Biological Conservation*. 169: 147-156.
- Choi HA, Lee WK, Jeon SW, Kim JS, Kwak HB, Kim MI, Kim JT. 2014. Quantifying Climate Change Regulating Service of Forest Ecosystem - Focus on Quantifying Carbon Storage and Sequestration. *Journal of Climate Change Research*. 5(1): 21-36. [Korean Literature]
- Costanza R, Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Raskin RG. 1998. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological economics*. 25(1): 3-16.
- Dalkey NC. 1969. The Delphi method: an experimental study of group opinion. Rand, Santa Monica, CA.
- De Groot RS, Wilson MA, Boumans RM. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions goods and services. *Ecological economics*. 41(3): 393-408.
- European Commission, Organisation for Economic Co-operation and Development, United Nations, World Bank. 2013. System of Environmental-Economic Accounting 2012 Experimental Ecosystem Accounting. 1-204.
- Ewing DM. 1991. Future competencies needed in the preparation of secretaries in the state of illinois using the Delphi echnique. *Illinois Digital Environment for access to learning and scholarship*.
- Fischer J, Lindenmayer DB, Manning AD. 2006. Biodiversity, ecosystem function, and resilience: ten guiding principles for commodity production landscapes. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 4(2): 80-86.
- Geijzendorffer IR, Roche PK. 2013. Can biodiversity monitoring schemes provide indicators for ecosystem services?. *Ecological Indicators*. 33: 148-157.
- Heo YJ, Park DY, Kang SO. 2015. Establishing the Concept of Competency-oriented Society and Extracting its Components Using a Delphi Method. *The Journal of Vocational Education Research*. 34(6): 53-71. [Korean Literature]
- Kang BH, Seo WS, 2016. A Study on the Importance of Location Selection Factors of Integrated Resorts Using AHP. *Korea academic society of tourism and leisure*. 28(3): 149-166. [Korean Literature]
- Kim GT, Choo GC. 2000. Comparison of Growth Condition of *Abies koreana* Wilson by Districts', *Korean Journal of Environment and Ecolog*. 14(1): 80-87. [Korean Literature]
- Kim NS, Han DU, Cha JY, Park YS, Cho HJ, Kwon HJ, Cho YC, Oh SH, Lee CS. 2015. A Detection of Novel Habitats of *Abies Koreana* by Using Species Distribution Models(SDMs) and Its Application for Plant Conservation. *J. Korean Environmental Restoration Technology*. 18(6): 135-149. [Korean Literature]
- Kim NS, Lee HC. 2013. A Study on Changes and Distributions of Korean Fir in Sub-Alpine Zone. *J. Korean Environmental Restoration Technology*. 16(5): 45-57. [Korean Literature]
- Kim TG, Oh JG. 2016. Analysis of the Location Environment of the Sub-alpine Coniferous Forest in National Parks Using GIS - Focusing on *Abies koreana* -. *J. Korean*

- Society of Limnology. 49(3): 236-243. [Korean Literature]
- Kim TY, Kim CK, Maeng JH, Jang SJ, 2015. A Study on Strategic Environmental Assessment Guideline for Site Selection of Offshore Wind Farm Project. Korea Environment Institute. [Korean Literature]
- Kim TY, Song CH, Lee WK, Kim MI, Lim CH, Jeon SW, Kim JS, 2015. Habitat Quality Valuation Using InVEST Model in Jeju Island. J. Korea Society of Environmental Restoration Technology. 18(5): 1-11. [Korean Literature]
- Kong WS. 2015. Selection of Vulnerable Indicator Plants by Global Warming. Korea meteorological society. 41(2-1): 263-273. [Korean Literature]
- Koo KA, Kim JU, Kong WS., Jung HC, Kim GH. 2016. Projecting the Potential Distribution of *Abies koreana* in Korea Under the Climate Change Based on RCP Scenarios. J. Korean Enc. Res. Tech. 19(6): 19-30. [Korean Literature]
- Korea Forest Research Institute. 2014. Biodiversity Convention (CBD) Recent Negotiations Trend and Countermeasures. Korea Forest Research Institute. Seoul, Korea. [Korean Literature]
- Lee DK, Lee MK, Jung TY. 2014. Biodiversity, discuss economic. bomoondang, Seoul.
- Lee HW, Kim CK, Hong HJ, Roh YH, Kang SI, Kim JH, Shin SC, Lee SJ. 2015. Development of Decision Supporting Framework to Enhance Natural Capital Sustainability: Focusing on Ecosystem Service Analysis. Korea Environment Institute. 2015(0): 3479-3651. [Korean Literature]
- Lee JS. 2001. Delphi Method. Kyoyookbook, Seoul.
- Luis Felipe de Almeida Duarte, Caroline Araujo de Souza, Caio Rodrigues Nobre, Camilo Dias Seabra Pereira, Marcelo Antonio Amaro Pinheiro. 2016. Multi-level biological responses in *Ucides cordatus* as indicators of conservation status in mangrove areas from the western atlantic. Ecotoxicology and Environmental Safety. 133: 176-187.
- Luther JE, Fournier RA, Hall RJ, Ung CH, Guindon L, Piercey DE, Lambert MC, Beaudoin AR. 2002. Astratege for mapping Canada's forest biomass with Landsat TM imagery. 1312-1315.
- MA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. Ecosystems and Biodiversity: ecological and economic foundations. UNEP.
- Min SJ, Lee GG, Kim JS. 2013. A Study on ABS Cases for Securing Sovereignty Rights on the Native Biological Resources. J. Environmental policy. 21(4): 45-66. [Korean Literature]
- National Institute of Biological Resources. 2011. Nagoya Protocol Guidebook. National Institute of Biological Resources. Incheon, Korea. [Korean Literature]
- National Institute of Biological Resources. 2016. Support and Consulting for Biological Industry in Response to Nagoya Protocol. National Institute of Biological Resources. Incheon, Korea. [Korean Literature]
- Park HC, LEE JH, Lee JH, Um GJ. 2015. Environmental features of the distribution areas and climate sensitivity assesment of Korean Fir and Khinghan Fir. Journal of Environmental Impact Assessment. (24):3 260-277. [Korean Literature]
- Regulatory Reform Committee. 2015. 2015 Test Project Manual for the Total Cost of

- Administrative Regulations. Sejong, Korea. [Korean Literature]
- Roh YH. 2016. Introduction to the Estimation of Carbon Storage and Space Distribution. Science and Technology Policy Institute. 26(5): 46-51. [Korean Literature]
- Seo SB. 2017. Analysis of habitat quality in the Nam-Han River Upstream Watershed using InVEST model. Master's thesis, Ewha Woman, Seoul. Korea. [Korean Literature]
- Sharp R, Tallis HT, Ricketts T, Guerry AD, Wppd SA, Chaplin-Kramer R, Nelson E, Wolny S, P;wero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim CK, Guannel G, Papenfus M, Tofr J, Marsik M, Bernhardt J, Griffin R, Glowinski K, Chaumont N, Perelaman A, Lacayo M, Mandle L, Hamel P, Vogl AL, Rogers L, Bierbower W. 2015. InVEST User's Guide. Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund.
- 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. The Korean Association of Geographic Information Studies. 18(1): 120-134. [Korean Literature]
- Song KM, Kim CS, Joh JG, Kang CH, Kim MH. 2010. Vegetation Structure and Distributional Characteristics of *Abies koreana* Forests in Mt. Halla. Journal of Environmental Science International. 19(4): 415-425. [Korean Literature]
- Song SH, Kwon SH, Hong SK, Park JB, 2008. Application of the Delphi Technique in Modifying AHP Method. Korean Institute of Industrial Engineers. 11: 964-971. [Korean Literature]
- TEEB. 2010. The economics of ecosystems and biodiversity: ecological and economic foundations. Edited by Pushpam Kumar, Earthsca, London.
- Terrado M, Sabater S, Chaplin-Kramer B, Mandle L, Ziv G, Acuna V. 2016. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning. Science of the total environment. 540: 63-70.
- Vigerstol KL, Aukema JE. 2011. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. Journal of environmental management. 92(10): 2403-2409.