

산림의 수자원 공급 생태계서비스 평가를 위한 InVEST Water Yield 모형의 적용*

송철호¹ · 이우균^{1*} · 최현아¹ · 전성우¹ · 김재욱² · 김준순³ · 김정택³

Application of InVEST Water Yield Model for Assessing Forest Water Provisioning Ecosystem Service*

Chol-Ho SONG¹ · Woo-Kyun LEE^{1*} · Hyun-Ah CHOI¹
Seong-Woo JEON¹ · Jae-Uk KIM² · Joon-Soon KIM³ · Jung-Taek KIM³

요 약

본 연구에서는 Natural Capital Project에서 개발된 InVEST Water Yield 모형을 통해 국내 산림의 수자원 공급 서비스를 평가하고 적용성을 검토해 보았다. InVEST Water Yield 모형은 총 8가지의 필수 입력자료를 요구하며, 그 중 6가지는 공간자료로, 2가지는 계수로 설정되었다. 국내에서 쉽게 활용 및 보정 가능한 자료를 이용한 모형 구동 결과, 우리나라 산림생태계의 수자원 공급서비스 총량인 수원함량은 2011년을 기준으로 9,409,622,083톤으로 나타났다. 이 결과는 해당년도 강우량의 분포와 비슷한 경향을 보였으며, 대상지에서 공간분석을 통해 이뤄진 기존 연구 및 통계적으로 분석된 전국 규모의 연구 결과와 비교 시 차이를 보였다. 이러한 차이는 모형의 기작 특성에 따른 통계적 방식과 공간적 구현 방식에서의 차이로 인해 발생하는 것으로 파악되었다. 따라서 InVEST 모형의 활용은 현 시점에도 개발이 지속되고 있는 상황임을 감안해야 하며, 정량적인 평가보다는 정성적인 평가에 중점을 두어야 할 것이다. 또한 향후 모형의 고도화를 위해서는 우리나라에 맞는 입력자료의 작성 및 멀티모델링을 통한 비교를 통해 정확성을 향상시켜야 한다.

주요어 : 생태계서비스, InVEST 모형, 공급서비스, 수원함량

2014년 12월 7일 접수 Received on December 7, 2014 / 2015년 2월 12일 수정 Revised on February 12, 2015 / 2015년 2월 24일 심사완료 Accepted on February 24, 2015

* 본 연구는 2014년도 환경부 차세대 에코이노베이션 기술 개발사업 지원으로 수행되었음(과제번호: 2012000210002).

1 고려대학교 환경생태공학과 Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University
2 한국환경정책·평가연구원 국토환경정보센터 Environmental Information Center, Korea Environment

Institute
3 강원대학교 산림경영학과 Dept. of Forest Management, Kangwon National University

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

ABSTRACT

InVEST Water Yield model developed by Natural Capital Project was applied for South Korea to assess domestic forest ecosystem's water provisioning services. The InVEST Water Yield model required 8 input dataset, including six spatial map data and two derived by coefficients. By running the model with relatively easy acquired and modified data, the result of domestic forest ecosystem's water provisioning services was 9,409,622,083 ton using the standard of the year 2011. The result showed similar patterns and distribution of rainfall in 2011, but showed difference when compared with existing researches spatially driven in nationwide statistical analysis results. This difference is assumed to occur with different model mechanism in spatial implementation and statistical analysis. So given that the model is currently still developing, applications should be taken on qualitative perspectives rather than on quantitative perspectives. Additionally, for advancing the application of InVEST water yield model, quantification of suitable input data and comparison using multi-modeling is required.

KEYWORDS : *Ecosystem Services, InVEST Model, Provisioning Services, Water Yield*

서 론

새천년생태계평가(Millennium Ecosystem Assessment, MA, 2005)에 따르면, 생태계서비스(Ecosystem Services, ES)는 생태계로부터 인간이 얻는 편익(benefits)으로, 크게 생산(provisioning), 조절(regulating), 지원(supporting), 문화(cultural) 서비스로 분류된다. MA 외에도 Daily(1997), Costanza *et al.*(1997), de Groot *et al.*(2002), 생태계 및 생물다양성의 경제학(The Economics of Ecosystem and Biodiversity, TEEB, 2010), Burkhard *et al.*(2009), UK NEA(2011) 등의 다양한 연구를 통해 생태계서비스의 정의와 기능분류, 계량화와 가치평가가 진행되었으며, 대상지를 중심으로 한 사례연구에서부터 국가적 평가에 이르기까지 그 공간적 범위를 확장시켜왔다(Ahn, 2013; Choi *et al.*, 2014). 특히 최근 진행된 해외의 국가 차원의 생태계서비스 평가에서는 개발과 보전에 따른 합리적 의사결정을 위해 보다 신뢰성 있는 자료를 요구하며, 적절한 가치평가방법의 적용과 함께 과

학적 방법에 근거한 모델링을 통한 계량화와 지도화(mapping)의 중요성이 강조되고 있다(Crossman *et al.*, 2013; Choi *et al.*, 2014).

우리나라에서 생태계서비스와 관련된 연구는 초기단계이며, 그 중 산림부문에서 가장 많은 연구가 진행 중에 있다. 산림을 대상으로 Kim *et al.*(2007; 2010)은 수원함양기능, 산림정수기능, 토사유출방지기능, 토사붕괴방지기능, 대기정화기능, 산림휴양기능, 야생동물보호기능 등 7가지 기능에 대해 계량화 및 가치평가를 진행하였으며, Oh and Yeo(2011)는 동일한 계량화 방법을 부산지역 산림에 적용하여 가치평가를 수행하고 이를 지도화하였다. 또한 Ryu and Lee(2013)는 TEEB접근법을 바탕으로 수도권 그린벨트 지역의 토지피복도에 평가지표와 가치산정 기준을 선정하여 생태계서비스를 평가하였다.

하지만 이러한 기존의 연구사례들은 연구결과를 공간정보를 통해 구현하여 제시하지 못했다는 한계점을 가진다. 이러한 현상은 지도화를 위해서 구축된 기초적인 현장자료의 부족에 기인하고 있다(Chung and Kang, 2013). 따라서 생태계서비스평가를 위해 직접적으로 지도

화가 가능한 해외 모형을 적용하여 이를 해결하고자 하는 노력이 여러 차례 진행되었다. 지도화의 가능성을 포함한 생태계서비스 평가 모형의 적용성 분석은 산림의 수자원 공급서비스를 대상으로 진행되었는데, 총 11개 해외모형을 분석하여 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoff)와 Water GAP모형이 적합한 것으로 제시하였다(Choi *et al.*, 2014). 공급서비스에 대한 생태계서비스 분석은 인간의 주요 활동과 밀접한 연관이 있고, 직접적인 만족감의 증가로 이어질 수 있다는 점에서 중요하다(UK NEA, 2011). 특히 산림의 수자원 공급서비스를 관리하는 것은 녹색댐으로 일컬어지는 산림의 담수를 통해 이상기후로 인한 홍수 혹은 물 부족현상에 대해 대처할 수 있는 수단으로써, 생태계의 기능을 정확히 파악하고 생태적으로 안정되고 지속 가능한 관리를 수행 할 필요성이 있다(Lee, 2007; Kim *et al.*, 2012).

따라서 본 연구에서는 산림생태계의 수자원 공급서비스의 계량화 결과를 가치평가로 이어지기 위해서 필요한 톤(ton) 단위의 결과를 산출해 낼 수 있으며(Choi *et al.*, 2014), 중첩분석을 통해 서남해안연안의 생태 분석과 경제적 상관관계를 파악(Chung, 2012)하는데 적용되었던 InVEST 모형을 국내에 적용하였다. 이를 통해 산림수자원 공급서비스 평가를 위한 해외 모형 적용 결과와 기존 국내 연구 결과의 차이를 확인하고, 그 원인을 파악하고자 한다. 또한 모형 적용 과정에 있어서의 유의점을 바탕으로 계량화와 지도화를 통한 활용 방안을 제언하고자 한다.

연구 방법

1. 연구 범위 및 흐름

본 연구에서는 우리나라 전체 산림을 연구대상지로 설정하였으며, Jeon *et al.*(2013)이 고안한 방법을 통해 산림지역을 도출하였다. 이 방법은 산림의 생태계서비스 기능평가를 위해

제시된 것으로 임상도 기준 면적에 비해 약 40만ha 정도 적은 수치이나 산림의 유형분류를 임종, 임상, 임령에 따라 15가지로 분류하여 각각의 차이에 따른 생태계서비스의 차이를 파악에 유용한 방법이다. 위 방법을 통해 공간해상도는 10m×10m로 설정되었으며, 이는 산림면적으로 약 563만ha에 해당한다.

산림생태계의 수자원공급 서비스 계량화는 InVEST 모형을 이용하였다. InVEST는 미국 National Capital Project에서 오픈소스로 제공하는 모형으로 자연자산(Natural Capital)과 생태계서비스와 관련된 의사결정을 지원하기 위해 개발되었다. InVEST모형은 2008년 10월 Version 1.0이 출시된 이후 ArcGIS나 QGIS와 같은 상용소프트웨어와 연동되어 사용할 수 있도록 개량되었으며, 각각의 하부모형들이 개별적으로 개발을 통해 추가 및 통합이 진행되었다. 기본적으로 InVEST 모형은 토지피복 및 토지이용 지도를 바탕으로 비교적 쉽게 자연자산의 가치나 생태계서비스를 지도화하여 파악할 수 있기에 전 세계적으로 널리 사용되고 있다(Vigerstol and Aukema, 2011; Sharp *et al.*, 2014).

InVEST 모형은 상용프로그램과 연동하여 진행하는 방식과 자체 배포된 소프트웨어를 사용하는 방식으로 나누어 구동이 가능하다. 본 연구에서는 2013년 12월 출시된 InVEST Version 2.6.0을 기준으로, 자체 제작된 소프트웨어 중 수자원 공급서비스 기능에 해당하는 하부모형인 Water Yield : Reservoir Hydropower Production 모형을 사용하였다. 총 17개의 하부모형으로 구성된 InVEST Version 2.6.0 내 Water Yield 하부 모형은 해양(Marine), 육상 및 수문(Terrestrial and Freshwater), 실험적 모형(Experimental)으로 구분되었던 InVEST 자체 분류 체계에 따르면 육상 및 수문 모형들의 집합에 해당하며, 이후의 분류 구분인 지원생태계서비스(Supporting Ecosystem Services)와 최종생태계서비스(Final Ecosystem Services)의 개념에서는 후자에 해당한다(Sharp *et al.*, 2014).

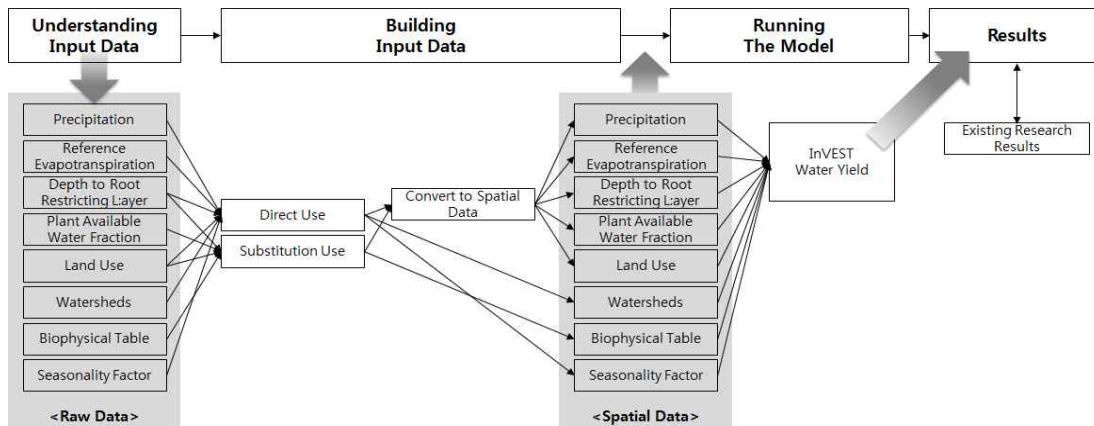


FIGURE 1. Assessing forest water provisioning ecosystem services

본 연구에서는 그림 1과 같이 InVEST Water Yield 모형의 국내 적용을 수행하였다. 국내에서 가용한 입력자료 현황을 우선적으로 파악하였는데, InVEST Water Yield에서 요구하는 자료의 내용과 직접적으로 일치하는 경우 해당 자료를 이용하였으며, 해당 자료가 존재하지 않은 경우에는 대체 자료를 이용하여 공간자료화 하였다. 공간적으로 단절된 자료들은 보간법을 이용하였고, 기존 구축된 주제도에 자료를 입력 할 수 있는 경우에는 통계자료를 입력하여 공간자료 구축되었으며, 이러한 과정은 상용 프로그램인 Arcmap 10.2.1과 QGIS 2.6.1를 통해 수행되었다.

2. 입력자료

InVEST Water Yield 모형의 필수적인 구동에 필요한 자료는 총 8가지로 표 1과 같다. 이 자료들은 그 특성에 따라 기상자료, 물리적자료, 속성자료로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 추가자료(Sub-Watersheds, Results Suffix)는 제외하였다. 입력자료는 InVEST 모형에서 제공하는 User Guide에 기초하여 Sample Data의 형식에 따라 보정되었다. 또한 요구하는 입력자료의 확보가 어려운 경우 InVEST 모형에서 제공하고 있는 샘플 데이터나 글로벌 자료를 이용하였다. 입력자료를 산림만으로 국한하였을 시 산림지역 경계부분에 위치한 유역

TABLE 1. Input data of InVEST water yield

Classification	Input data name	Data from	Reference
Meteorological data	Precipitation	Raster	Precipitation(KMA)
	Reference evapotranspiration	Raster	MODIS evapotranspiration(NTSG)
	Depth to root restricting layer	Raster	Root depth(Canadell <i>et al.</i> , 1996) Soil Depth(WAMIS)
Physical data	Plant available water fraction	Raster	Water porosity(Yoon <i>et al.</i> , 2003) Soil map(RDA)
	Land use	Raster	Land cover map(Ministry of Environment; Jeon <i>et al.</i> , 2013) Forest type map(Korea Forest Service)
	Watersheds	Shape	Watersheds(WAMIS)
Attribute data	Biophysical table	Table	InVEST sample data
	Seasonality factor	Number	1

과의 상호작용이 고려되지 않기 때문에 모형 결과의 신뢰성이 낮아지게 된다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 전국토를 대상으로 자료를 구축하여 모형의 입력자료로 활용하였다.

1) 기상자료

Precipitation은 2011년 기준 기상청의 전국 78개 강우량 관측값을 이용하였으며, 각 지점의 point 자료는 IDW(Inversed Distance Weighted) 방법을 통해 보간되어 공간적으로 구축되었다(Shepard, 1986; Kim *et al.*, 2010; Park and Kim, 2013). 국내에서 Reference Evapotranspiration과 관련하여 20개의 point에서의 증발산량과 공간정보를 제공하는 Lee and Cho(2011)의 연구가 존재했으나, 일부 도시지역에만 point가 설정되어 있어 전국을 대상으로 한 보간에는 한계가 있었다. 따라서 대체 자료로는 미국 몬테나주립대학교의 NTS(Numerical Terradynamic Simulation Group)가 NASA Earth Observing System과의 파트너십을 통해 생산해 낸 MODIS 영상 기반 증발산량 자료를 이용하였다. 해당 자료는 2011년 기준으로 MOD16 Global Evapotranspiration(ET)로써, 약 1km×1km의 공간해상도와 8일 간격의 시간해상도를 갖고 얻어진 자료를 월간 및 연간 사용이 가능하도록 수정하여 공개 된 것이다.

2) 물리적자료

Depth to Root Restricting Layer는 식생의 뿌리깊이로 현재 우리나라에는 이와 관련된 공간적 자료가 존재하지 않기에, Canadell *et al.*(1996)이 제시하는 침엽수, 활엽수, 농지, 초지 등으로 구분 된 최대 뿌리깊이를 Jeon *et al.*(2013)이 고안 한 산림생태계서비스 평가를 위한 유형 분류 방법을 적용하여 공간화하였다. 해당 분류방법에서 나타난 침엽수, 활엽수에는 최대 뿌리 깊이로 제시 된 3.9m, 2.9m를 적용해 주었으며, 혼효림의 경우에는 평균값인 3.4m를 사용하였다. 이는 생태계 분류방법으로 분류 된 산림지역을 모두 포함하지만, 전국 적용 시에는 자료의 공백이 발생 할 수 있으므로 토지

피복도를 이용하여 초지지역은 2.6m를 농경지에 대해서는 2.1m를 적용하였다. 또한 그 외의 지역에는 국가수자원종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 토심자료의 최대값을 대체하여 보완하였다. Plant Available Water Fraction은 식물 토양 내 공극률로 물 함유지반의 공극률 범위에 대해 지반의 재질에 따라 점토, 실트, 균일모래 등으로 구분한 것을 흙토람에서 제작한 토양도의 토성자료에 적용하여 공간적으로 산출하였다(Yoon *et al.*, 2003). Land Use는 환경부 중분류토지피복도를 바탕으로 하여 마찬가지로 생태계서비스 유형 분류를 적용하였다. 해당 분류 시에는 임상도를 참조하여 임상 및 임령에 대한 속성자료를 확인하였다. 또한 모형 구동 시 Biophysical Table과의 연계를 위하여 환경부의 분류를 해당 코드 값을 수정하여 적용하였다. Watersheds는 표준유역도의 소분류 자료를 이용하였으며, 형식은 폴리곤 형식으로, 국가수자원종합정보시스템에서 제공하는 것을 그대로 이용하였다.

3) 속성자료

Biophysical Table은 생물리적 값에 대한 표로, 각 정보와 Land Use의 분류가 코드를 통해 연결된다. 본 연구에서는 환경부에서 구축한 중분류 토지피복도의 분류 구분을 활용하여 각 코드 값을 선정하였으며, 그 결과는 표 2와 같다. 이 때 공간자료와는 다르게 해당 토지피복에서의 적용 될 수 있는 증발산량, 식생의 뿌리깊이, 증발산량 등이 식생의 유무에 따라 다르게 적용된다. Seasonality Factor는 1~10의 계수에서 선택할 수 있으며, 1은 계절풍 몬순기후, 4는 열대기후, 9는 온대기후를 나타낸다. 특히 1에 가까울수록 여름에 강우가 집중되며 10에 가까울수록 겨울에 강우가 집중되는 현상을 보인다(Sharp *et al.*, 2014). 우리나라는 온대기후이나, 계절풍의 영향을 받는 몬순기후의 성격을 가지며, 여름철 강우가 집중되는 현상을 고려하여 1로 값을 설정하였다.

TABLE 2. Code for land cover map classification

[illegible]

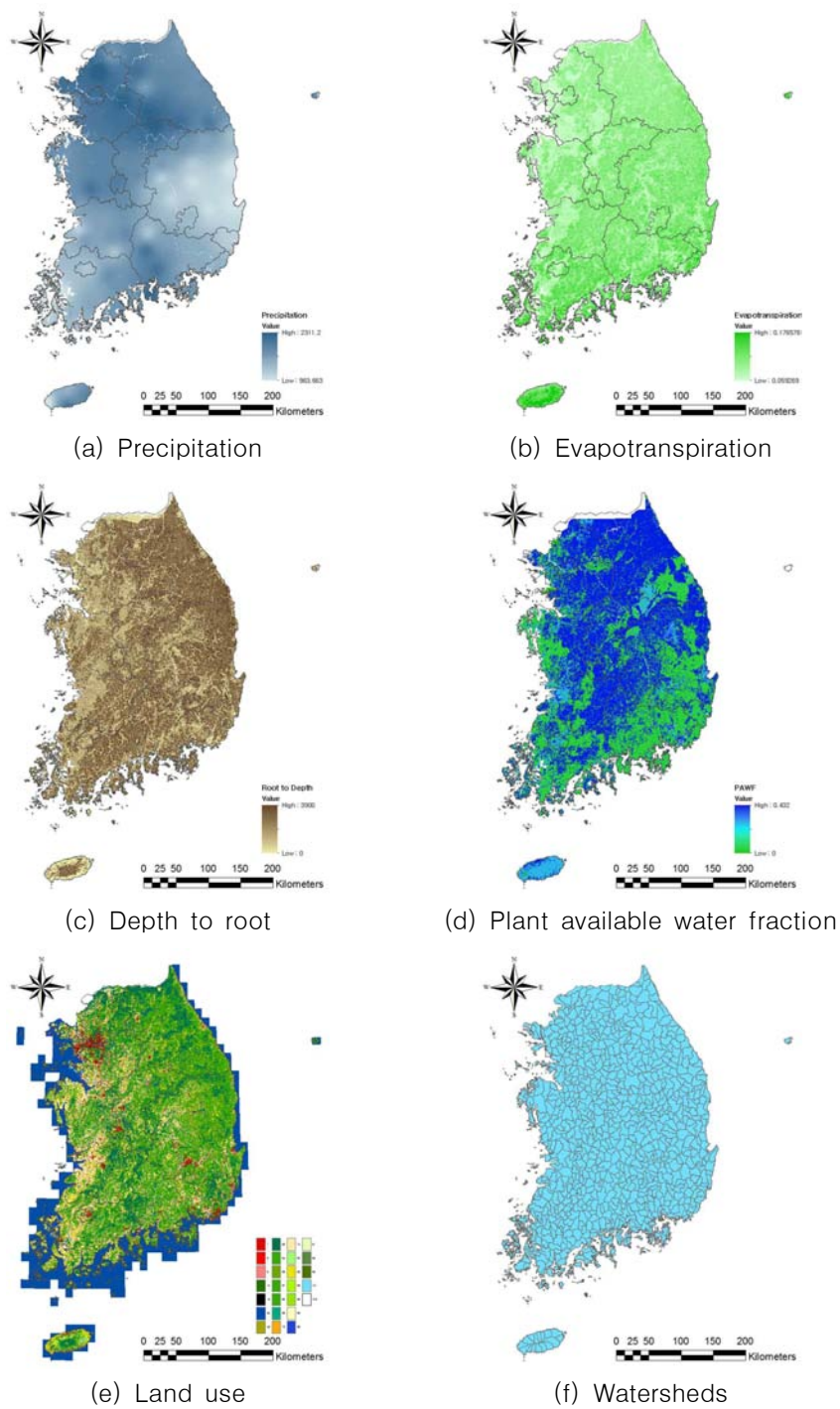


FIGURE 2. Spatially modified input data for InVEST water yield

3. 모형의 구동

그림 2와 같이 공간적으로 구축된 입력자료는 InVEST Water Yield 모형을 통해 각 픽셀별로 계산되어진다. 수자원 공급량인 $Y(x)$ 는 기본적으로 식 (1)과 같으며, 연 평균 강수량인 budyko 곡선의 함수식을 따른다. $AET(x)$ 는 픽셀의 evapotranspiration이며, $P(x)$ 는 픽셀의 연간 precipitation이다. 이 때 증발산량으로 손실되는 양을 식 (2)와 같이 산정 할 수 있는데, 공극률인 $w(x)$ 는 Seasonality Factor인 Z 의 값과 식생의 수분함량인 $AWC(x)$ 에 따라 식 (3)과 같이 반영된다. 강우 대비 잠재증발산량 비율인 $R(x)$ 은 식 (4)와 같이 적용되며, 이 때 $K_c(\ell_x)$ 는 각 픽셀별로 토지피복에 따른 식생 증발산량의 계수이며, $ET_0(x)$ 은 기준 증발산량이다. 따라서 최종적인 $AET(x)$ 는 식 (5)와 같다(Zhang *et al.*, 2001; Larson, 2014; Sharp *et al.*, 2014).

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \times P(x) \quad (1)$$

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = \frac{1 + w(x) \times R(x)}{1 + w(x) \times R(x) + (1 \div R(x))} \quad (2)$$

$$w(x) = Z \times \frac{AWC(x)}{P(x)} \quad (3)$$

$$R(x) = \frac{K_c(\ell_x) \times ET_0(x)}{P(x)} \quad (4)$$

$$AET(x) = K_c(\ell_x) \times ET_0(x) \quad (5)$$

InVEST Water Yield 모형은 각 픽셀별로, 해당 픽셀에 해당하는 강우량이 증발산량을 통해 손실되는 양과 공극률 및 뿌리깊이에 대한 각 토지피복별 특성과 그 계수에 따라 함유 가능한 양을 계산한다고 할 수 있다. 이러한 전체적인 과정은 그림 3과 같다.

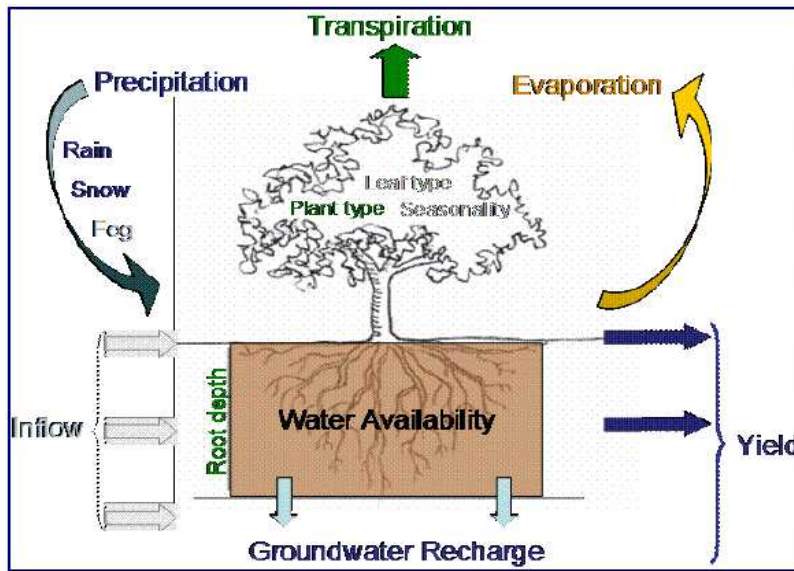


FIGURE 3. InVEST water yield flow (Source : Sharp *et al.*, 2014)

결과 및 고찰

1. InVEST Water Yield 구동 결과

InVEST Water Yield 구동 결과 2011년 기준 우리나라 산림생태계의 수자원 공급서비스 총량은 9,409,622,083톤으로 나타났다. 이 결과는 10m×10m로 구성된 픽셀 563,036,577 개의 래스터 자료로 평균 1,671.22톤/ha(최소값: 965.27톤/ha; 최대값: 2,309.62톤/ha)에 해당하는 값을 가진다. 전체적인 공급서비스의 분포는 그림 4에서 나타나는 것과 같이 전체적으로 한강유역의 산림에서 높은 것으로 나타났으며, 그 외에 지리산 주변 유역에서도 높은 것

으로 나타났다. 그러나 경북지역의 산림에서는 수자원 공급량이 적은 것으로 나타났으며, 특히 해안가를 중심으로 감소하는 경향을 보였다.

또한 모형 구동 결과는 입력자료인 해당 시점의 강우량(최소값: 963.66톤/ha; 최대값: 2,305.92톤/ha; 평균값: 1,672.15톤/ha)과도 양적으로 비슷하였고, 전국적인 분포에서도 강우량이 높은 곳에서 수자원 함량이 높게 나타나는 연관성을 보여주었다. 이는 수자원 공급량이 높게 나타난 한강 유역에서 입력자료인 강우량 또한 높은 것을 통해 확인 할 수 있었다. 그러나 강우량과의 최대값과 최소값 범위는 비슷하나, 그 사이에서 그림 5와 같이 임상별, 임

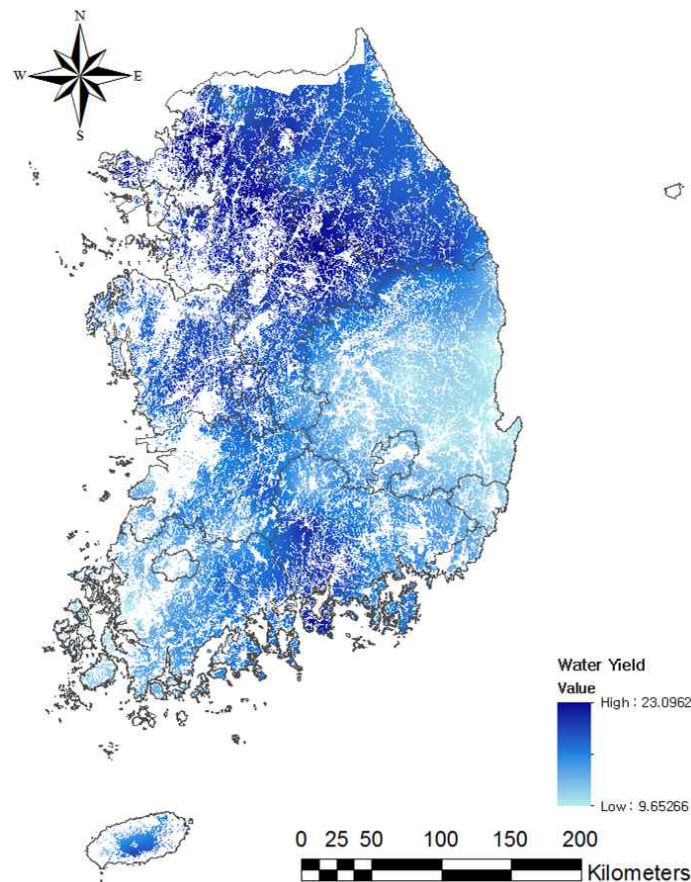


FIGURE 4. Map of InVEST water yield result (total)

령별로 세분화 하여 파악할 경우 각각의 수자원 공급서비스에는 차이가 있었다.

산림의 임상을 산림생태계서비스 평가를 위한 유형 분류를 통해 침엽수림, 활엽수림, 혼효림으로 구분 시, 공급하는 수자원의 총량은 침엽수림, 혼효림, 활엽수림 순으로 많은 것으로 나타났다. 그러나 ha 당 공급량은 활엽수림, 침엽수림, 혼효림 순으로 나타났다. 임령을 0~2영급, 3~4영급, 5영급 이상으로 구분 시, 가장

많은 면적을 차지하고 있는 3~4영급의 산림에서 가장 많은 수자원을 공급을 담당하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 ha 당 공급량은 영급이 높아질수록 증가하는 경향을 보여주었으며, 전체적으로는 표 3과 같다.

2. 국내외 기존 연구 비교

InVEST Water Yield 모형은 지도로 결과가 구현되기 때문에 전국을 대상으로 공간적으로

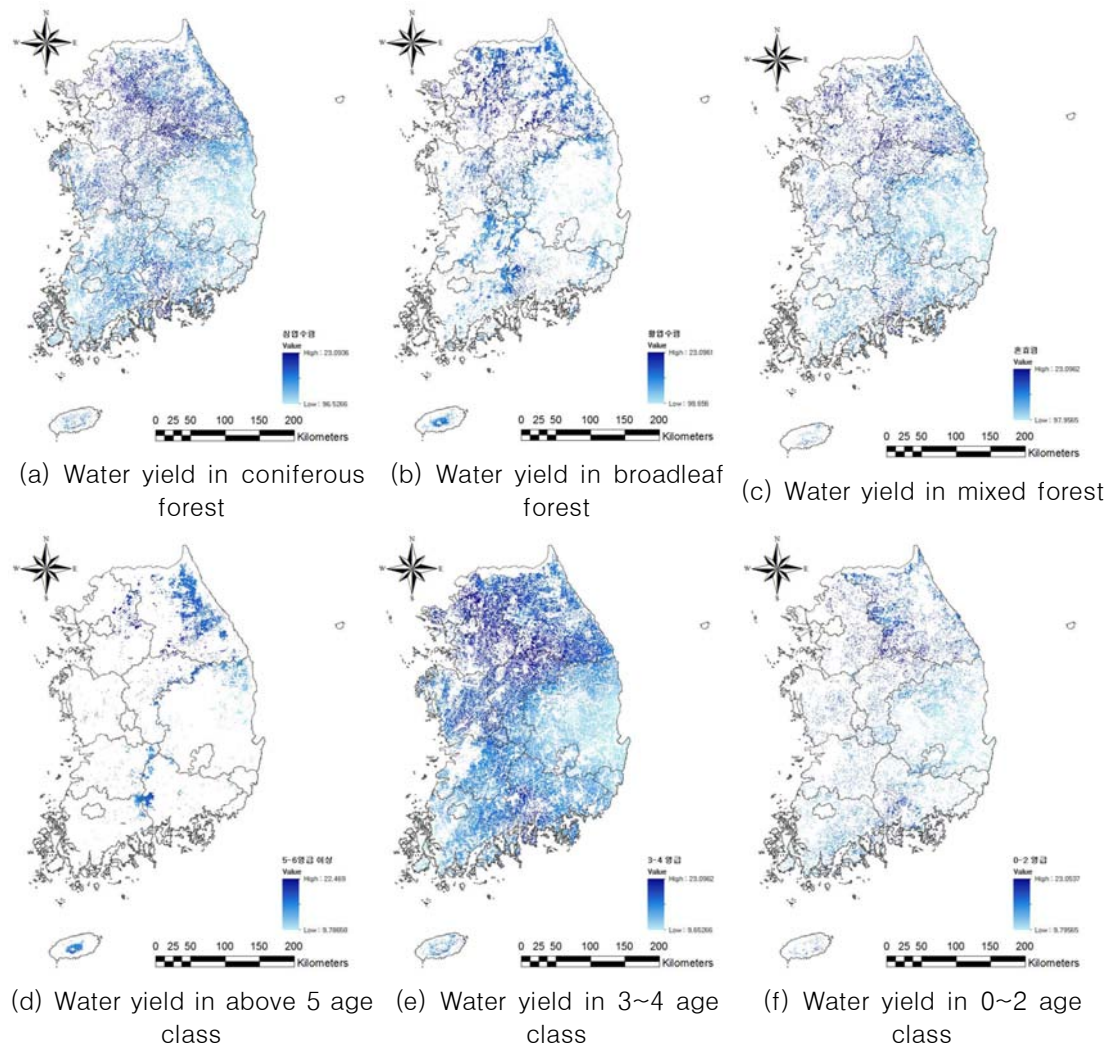


FIGURE 5. Map of InVEST water yield results (classified forest types and age classes)

TABLE 3. Classification result of InVEST water yield(forest types and age classes)

Classification		Number of pixels (10m×10m)	Water yield (ton)	Water yield (ton/ha)	Min (ton/ha)	Max (ton/ha)
Forest types	Coniferous	241,242,261	3,993,684,236	1,655.46	965.27	2,309.36
	Broadleaf	149,222,381	2,584,092,587	1,731.71	976.56	2,309.61
	Mixed	172,571,935	2,831,972,824	1,641.04	979.56	2,309.62
Age class	Above 5	54,879,167	950,689,638	1,732.33	978.66	2,246.90
	3~4	400,845,717	6,690,923,033	1,669.20	965.27	2,309.62
	0~2	107,311,693	1,768,132,425	1,647.66	979.56	2,305.37

구축 된 결과를 비교하는 것이 필요하다. 하지만, 전국을 대상으로 공간적으로 동일한 범주와 형태를 가진 비교 대상을 확보하기에는 어려움이 있었으며, 공간적으로 구동 된 결과값을 비교 할 수 있는 사례에는 Lee(2007)와 Oh and Yeo(2011)의 연구가 있었다.

전남 광양시 진상면을 대상으로 수원함양유지 증진에 대한 기회비용을 산정 한 Lee(2007)의 연구에서는 수원함량을 활엽수림 1,770톤/ha, 침엽수림 1,570톤/ha, 밤나무 인공조림지 1,530톤/ha로 추정하였다. Oh and Yeo(2011)는 부산시의 산림을 대상으로 하여 수원함량을 구하였으며 총 71,602,040톤으로 추정하였다. 이 결과를 적용 된 부산시 임상도면적인 337,384,937m²으로 나누었을 시 2,122.27톤/ha의 수원함량을 가진 것으로 환산할 수 있었다. 환산 된 결과를 InVEST Water Yield의 결과와 비교하였으며, 진상면 대상지로 추출하여 비교 하였을 시, 1,808.31톤/ha(최소값: 1,769.41톤/ha, 최대값: 1,849.33톤/ha)으로 나타나 과대추정 되는 경향을 보였다. 부산을 대상으로 추출하여 비교 시에는 1,460.63톤/ha(최소값: 1334.80톤/ha, 최대값: 1586.77톤/ha)으로 과소평가 되는 것으로 나타났다.

공간적으로 도출 된 결과를 제외하고 전국을 대상으로는 Jung *et al.*(2009)은 산림의 보수량을 180억톤으로 기술하였으며, Kim *et al.*(2010)은 조공극률을 바탕으로 한 산림의 최대 저류량을 190.6억톤으로 산정하여 산림의 수원함양기능으로 제시한 사례가 있다. 따라서 InVEST Water Yield의 결과는 이러한 통계적인 총량과 비교하면 약 2배정도 적은 수치로

나타난다.

이러한 InVEST Water Yield 모형의 결과의 정확성은 해외에서도 각각 차이를 보였다. 중국 Xitiaoxi 강 유역에 모형을 적용 한 사례에서는 Seasonal Factor를 다르게 하여 모의한 것을 실측치와 비교하여 수원함량을 추정하였으며(Zhang *et al.*, 2012), 미국 Shasta와 Tehama 카운티 지역을 대상으로 산불 전후의 수원함량을 모의하였을 시에는 USGS의 수문유출량에 비해 118%로 과대추정 되기도 하였다(Larson, 2014).

3. 모형 한계 및 활용

모형의 특성상 InVEST Water Yield는 과정 기반의 모형으로 강우가 내린 상황에서 증발산량으로 인한 손실량과 토지피복별 최대 저류량 고려하여 저류되는 수자원의 양을 평가한다. 따라서 모형의 결과는 강우 시 실제로 수자원이 공급서비스로 제공 될 수 있는 잠재량으로 해석해야 할 것이다. 반면 비교 대상으로 사용된 Lee(2007), Kim *et al.*(2007; 2010), Oh and Yeo(2011)의 연구는 대상 시업지를 바탕으로 한 실험적 모형으로, 모암에 따른 조공극률이 임상과 임령에 따라 변화하는 것을 회귀식을 통해 연구에 사용하였으며, 이러한 회귀식을 통해 나타난 수자원 함량에 대해서 ‘산림수자원의 실제량이라기 보다는 잠재 저류량’으로 인식하고 있는 차이가 있다.

또한 공간적인 분석을 통한 접근방식과 통계적인 접근에서의 차이로 인해 오차가 크게 발생했을 수 있다. InVEST Water Yield와 같은

모형들은 공간화에 있어서 기후, 토양, 토지피복, 수문유출 자료를 활용하기 때문에, 높은 공간 및 시간해상도를 확보하기 위해서는 입력자료로써 정확한 공간 데이터를 확보해야만 한다 (Crossman *et al.*, 2013). 그러나 국내 적용에 있어서는 가용 자료의 부족으로 인해 대체 자료를 이용 한 점, 각 계수를 제공되는 샘플에 의존한 점에 등의 한계가 있다. 마찬가지로 회귀식을 전국 통계자료에 적용하는 분석하는 경우나, 기존 주제도에 적용하여 공간적으로 나타내는 경우에도 시업지의 상황을 넓은 면적으로 일반화 하게 됨으로 분석에 어려움이 따른다.

하지만 한계점에도 불구하고 InVEST 모형은 적절한 자료가 주어졌을 시 GIS를 이용하여 공간적인 정보를 제공할 수 있으며, 수문모형 외의 다른 생태계서비스와의 연계를 통한 분석을 수행 할 수 있는 장점이 있다. 또한 InVEST 모형의 사용은 여러 가정 속에서 불확실한 결과를 도출하기도 하지만, 추후 모형의 활용성과 한계점을 인지하여, 생태계서비스에 관한 시사점을 파악하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 따라서 의사결정 단계, 혹은 평가하려는 생태계서비스에 따라서 정량적 혹은 정성적 접근이 필요할 것으로 판단된다. 정량적인 접근으로는 다른 수문 모형인 SWAT, VIC, ARIS, Water GAP 등을 활용 한 멀티모델링이 필요할 것이며, 정성적인 접근으로는 산림청의 산림 기능구분도에서 나타나는 기능평가와 접목한 접근 및 비교가 병행 될 수 있을 것이다(Kwon *et al.*, 2008; Vigerstol and Aukema, 2011; Kim *et al.*, 2011; Rukelshaus *et al.*, 2013; Choi *et al.*, 2014).

결론

InVEST 모형은 현재에도 개발이 진행 중인 모형으로 완성된 모형이라고는 할 수 없다. 이렇게 개발 중인 모형의 하부 모형인 Water Yield 모형을 국내에 적용 해 보았을 시, 사용 가능한 주제도나 실측데이터의 한계로 인해 정확성이 비교적 낮은 것으로 판단되었다. 그러나

정량적 평가의 한계에도 불구하고, 생태계서비스의 개념에서 개략적인 분포를 확인하거나, 정성적인 파악은 가능한 것으로 사료된다. 또한 토지피복도를 기반으로 한 다른 생태계서비스와 함께 평가 할 수 있고, 비교적 빠르고 쉽게 의사결정자들에게 정보를 제공 해 줄 수 있는 장점을 지니고 있었다. 따라서 모형의 정확성의 향상을 위해서는 우리나라에 맞는 모형의 입력 자료를 실측데이터에 기반 해 확보해야 하며, 각종 주제도 또한 의사결정자가 활용 시에 필요한 공간해상도 수준을 고려하여 구축 될 필요가 있다고 판단된다. 또한 모형의 활용 시에는 다른 여러 모형들을 통한 멀티모델링을 수행하여 정확성을 향상하는 것이 중요하다고 생각된다. 다만 현재 상황에서 InVEST Water Yield 모형을 활용하여 생태계서비스에 대한 평가가 이뤄져야 한다면, 토지피복에 기초한 모델링이 가능하다는 점에서 시계열 분석이나, 정규화 등을 통한 서비스의 정성적 상태를 도출하여 이용하는 것이 효과적일 것이다. 그러므로 향후 연구에서는 정량적인 결과의 정확성을 향상을 통해 보다 정확한 생태계서비스 평가가 가능하도록 우리나라에 맞는 모형의 개선이 요구된다. 

REFERENCES

- Ahn, S.E. 2013. Definition and classification of ecosystem services for decision making. *Journal of Environmental Policy* 12(2):3-16 (안소은. 2013. 의사결정 지원을 위한 생태계서비스의 정의와 분류, *환경정책연구* 12(2):3-16).
- Burkhard, B., F. Kroll, F. Muller, and W. Windhorst. 2009. Landscapes' capacities to provide ecosystem services - a concept for land-cover based assessment. *Landscape Online* 15:1-22.
- Canadell, J., R.B. Jackson, J.R. Ehleringer, H.A. Mooney, O.E. Sala and E.D.

- Schulze. 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia* 108(4):583–595.
- Choi, H.A., W.K. Lee, C. 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 국내적용성분석. *한국환경복원기술학회지* 17(4):1–15).
- Chung, M.G. 2012. Mapping ecosystem services and statistical analysis for ecosystem-based management of coastal area. Master's Thesis, Yonsei University.
- 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.
- Costanza, R., R.D. Arge, R.S. 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 world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253–260.
- Crossman, N.D., B. Burkhard, S. Nedkov, L. Willenmen, K. Petz, I. Palomo, E.G. Drakou, B. Martin-Lopez, T. McPhearson, K. Boynova, R. Alkemade, B. Egoh, M.B. Dumbar and J. Maes. 2013. A blueprint for mapping and modeling ecosystem services. *Ecosystem Services* 4:4–14.
- Daily, G.C. 1997. *Nature's Services Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington D.C.
- 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.
- Jeon, S.W., J. Kim and H. 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).
- Jung, Y.H., H.T. Choi, J.Y. Yoo and K.H. Kim. 2009. A study on hydrological environment depending on forest practices, research report 09–29. Korea Forest Research Institute (정용호, 최형태, 유재운, 김경하. 2009. 산림사업에 따른 유역의 물 환경 변화 연구, 연구보고 09–29. 국립산림과학원).
- Kim, H.H., Y.K. Park, H.J. Roh, J.H. Jeon, J.Y. Hwang, H.D. Kang and J.H. Park. 2011. A case study for evaluating forest functions by watershed unit: Gyeongsangnam-do. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 14(3):163–173 (김형호, 박영규, 노혜정, 전준현, 황진영, 강현득, 박준영. 2011. 경상남도 유역단위 산림 기능평가에 관한 사례연구. *한국지리정보학회지* 14(3):163–173).

- Kim, J.H., J.J. Kim, J.H. Jeon, Y.M. Son, K.H. Kim, H.J. Yoon, C.Y. Park and S.W. Lee. 2007. A study on the estimation and the evaluation methods of public function of forest, research report 07-05. Korea Forest Research Institute (김중호, 김재준, 전준현, 손영모, 김경하, 윤호중, 박찬열, 이승우. 2007. 산림의 공익기능 계량화 연구, 연구보고 07-05. 국립산림과학원).
- 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 (김중호, 김기동, 김래현, 박찬열, 윤호중, 이승우, 최형태, 김재준. 2010. 산림의 공익기능 계량화 연구, 연구보고 10-26. 국립산림과학원).
- Kim, J.H., R.H. Kim, H.J. Yoon, S.W. Lee, J.J. Kim, C.Y. Park and K.D. Kim. 2012. Valuation of nonmarket forest resources. The Journal of Korean Institute of Forest Recreation 16(4): 9-18 (김중호, 김래현, 윤호중, 이승우, 최형태, 김재준, 박찬열, 김기동. 2012. 산림공익기능의 경제적 가치평가. 한국산림휴양학회지 16(4):9-18).
- Kim, S.N., W.K. Lee, K.I. Shin, M. Kafatos, D.J. Seo and H.B. Kwak. 2010. Comparison of spatial interpolation techniques for predicting climate factors in Korea. Forest Science and Technology 6(2):97-99.
- Kwon, S.D., Y.K. Park and E.H. Kim. 2008. Study on forest functions classification using GIS - Chungyang national forest management planning -. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 11(4): 10-21 (권순덕, 박영규, 김은희. 2008. GIS를 이용한 산림기능구분에 관한 연구 - 춘양 국유림 산림경영계획구를 대상으로 -. 한국지리정보학회지 11(4):10-21).
- Larson, D. 2014. Quantifying and mapping changes in hydrologic ecosystem services from a large magnitude wildfire in Shasra and Tehama Counties, California. Master's Thesis, California State University, Chico.
- Lee, K.H. and H. Cho. 2011. Estimation of the reference evapotranspiration using daily sunshine hour. Journal of Environmental Impact Assessment 20(5):627-640 (이길하, 조홍연. 2011. 일조시간을 이용한 기준 증발산량 추정. 환경영향평가 20(5):627-640).
- 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 National University (이민경. 2007. 산림유역의 수원함양 유지·증진을 위한 기회비용 - 전남 광양 진상면 수어지 유역의 사례를 중심으로 -. 서울대학교 대학원 석사학위논문).
- MA(Millennium Ecosystem Assessment), 2005. Ecosystems and Human Well-being Millennium Ecosystem Assessment. Island Press. Washington D C.
- Oh, D.H. and U.S. Yeo. 2011. Improvement of forest public functions in Busan: application of monetary valuation. Busan Development Institute (오동하, 여운상. 2011. 산림의 가치평가를 통한 공익기능 향상 방안. 부산발전연구원).

- Park, J.C. and M.K. Kim. 2013. Comparison of precipitation distributions in precipitation data sets representing 1 km spatial resolution over South Korea produced by PRISM, IDW, and Cokriging. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 16(3): 147–163 (박종철, 김만규. 2013. PRISM, 역거리가중법, 공동크리깅으로 작성한 1km 공간해상도의 남한 강수 자료에서 강수 분포의 비교. *한국지리정보학회지* 16(3):147–163).
- Ruckelshaus, M., E. McKenzie, H. Tallis, A. Guerry, G. Daily, P. Kareiva, S. Polasky, T. Ricketts, N. Bhagabati, S.A. Wood, and J. Bernhardt. 2013. Notes from the field: lessons learned from using ecosystem services approaches to inform real-world decisions. *Ecological Economics*.
- Ryu, D.H. and D.K. Lee. 2013. Evaluation on economic value of the Greenbelt's ecosystem services in the Seoul Metropolitan Region. *Korea Planners Association* 48(3):279–292 (류대호, 이동근. 2013. 수도권 그린벨트 지역의 생태계 서비스 가치평가 연구. *국토계획* 48(3):279–292).
- 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. Mendoza, J. Aukema, J. Foster, J. Forrest, D. Cameron, K. Arkema, E. Lonsdorf, 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.
- Shepard, D. 1986. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced Data. *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference* 517–524.
- TEEB(The Economics of Ecosystems and Biodiversity). 2010. The economics of ecosystems and biodiversity. Ecological and Economic Foundations, London and Washington, 68pp.
- UK NEA(National Ecosystem Assessment). 2011. The UK national ecosystem assessment technical report. UNEP–WCMC, Cambridge, 1464pp.
- Vigerstol, K.L. and J.E. Aukema. 2011. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of Environmental Management* 92(10): 2403–2409.
- Yoon, T.H. 2003. Eco-environmental hydraulics. Cheong Moon Gak. Seoul. 207–233pp (윤태훈. 2003. 생태환경수리학. 청문각. 서울. 207–233쪽).
- Zhang, C., W. Li, B. Zhang and M. Liu. 2012. Water yield of Xitiaoxi river basin based on InVEST modeling. *Journal of Resources and Ecology* 3(1): 50–54.
- Zhang, L., W.R. Dawes and G.R. Walker. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37(3):701–708.
- NTSG(Numerical Terradynamic Simulation Group). <http://www.ntsg.umd.edu/>. 