

산림생태계 수자원 공급서비스 계량화 모형의 국내적용성 분석*

최현아¹⁾ · 이우균¹⁾ · 송철호¹⁾ · 이종열¹⁾ · 전성우²⁾ · 김준순³⁾

¹⁾ 고려대학교 환경생태공학과 · ²⁾ 한국환경정책·평가연구원 · ³⁾ 강원대학교 산림경영학과

Applicability Analysis of Water Provisioning Services Quantification Models of Forest Ecosystem*

Choi, Hyun-Ah¹⁾ · Lee, Woo-Kyun¹⁾ · Song, Cholho¹⁾ · Lee, Jong Yeol¹⁾
Jeon, Seong Woo²⁾ and Kim, Joon Sun³⁾

¹⁾ Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University,

²⁾ Korea Environment Institute,

³⁾ Department of Forest Management, Kangwon National University.

ABSTRACT

Forest ecosystems generate variety of important goods and services for human well-being. As a growing concern of climate change and water shortage, it is necessary to quantify, model and map water balance in forest. In this study, we have analyzed 11 overseas forest water supply models (AIM, ATEAM, CENTURY, (E)SWAT, GUMBO, InVEST, PLM, SAVANNA, WaSSI, WaterGAP, WBM) and compared their scale, input and out data, availability of the models and analyzed the applicability of the models to Korea. As a result, InVEST and WaterGAP model appeared to be applicable for quantifying water provisioning services in Korea. A systematic approach for applying to evaluate water balance in forest was suggested based on our quantification approach.

Key Words : *Forest Ecosystem service, Water cycle, Water Yield, Quantification.*

* 본 연구는 2013년도 환경부 차세대 에코이노베이션 기술 개발사업 지원으로 수행되었음(과제번호: 2012000210002).

First author : Choi, Hyun-Ah, Dept. of Environ. Sci. & Eco. Eng., Korea University,
Tel : +82-2-3290-4734, E-mail : sosobut@korea.ac.kr

Corresponding author : Lee, Woo-Kyun, Dept. of Environ. Sci. & Eco. Eng., Korea University,
Tel : +82-2-3290-3016, E-mail : leewk@korea.ac.kr

Received : 25 February, 2014. Revised : 11 July, 2014. Accepted : 30 June, 2014.

I. 서 론

생태계 서비스(Ecosystem Services, ES) 개념은 경관생태계 및 계획 측면에서 de Groot(1992)의 “자연의 기능(Function of Nature)” 접근방식을 기반으로 하고 있다. 인간의 관점에서 자연자원의 편익(benefit)을 평가하고 생태계가 제공하는 서비스를 평가하기 위한 시도는 Costanza et al.(1997)과 Daily(1997)가 대표적이다. 이후 de Groot et al.(2002)은 생태계 서비스를 대신하여 ‘기능’이라는 용어를 사용하였으며, 새천년생태계평가(Millennium Ecosystem Assessment, MA), 생태계 및 생물다양성의 경제학(The Economics of Ecosystems and Biodiversity, TEEB)등을 통해 생태계 서비스 및 그 가치에 대한 인식과 중요성이 인식되기 시작하였다. 다양한 연구에서 생태계 서비스는 자연자산 관리를 위한 의사결정에 활용하기 위해 분류·제시되고 있다(TEEB, 2010; UK NEA, 2011). 자연자원이 제공하는 서비스와 지속가능한 이용을 목적으로 하는 정책 이행 및 성과평가를 위해서는 생태계 서비스의 계량화(정량화)는 필수적이다(Ahn, 2013). 생태계 서비스 계량화를 위해서는 생태계 보전, 토지 이용 변화, 수문-생태학적(Hydro-ecological) 특성 및 연결성, 평가 규모 및 적용 범위 등을 고려해야 한다(IEEP et al., 2009; Egoh et al., 2012; Smart et al., 2012). 이때, 적절한 생태계 서비스 평가 방법론과 도구(tool)의 적용, 시·공간적 규모가 다른 생태계 서비스의 통합평가, 생태계가 외부 충격에 견딜 수 있는 임계치(threshold), 생태계 서비스 공급에 관한 다기능적 토지관리 등이 고려되어야 한다(Vandewalle et al., 2009). 생태계 서비스 계량화는 정책 이행으로 예상되는 추가적인 편익산정 등에 활용될 수 있으며, 이는 자연자산 가치평가와 연계되어진다.

우리나라 수자원총량 1,267억 톤 중 65%인 823억 톤이 산림지로부터 공급되며, 대부분의

수자원은 산림에서 발원되며 하천수는 산림상태 여하에 따라 양과 질이 좌우된다(Jung et al., 2009). 산림의 수자원함양기능은 물을 조절해 공공용수의 원활한 공급, 가뭄과 홍수 피해를 방지, 물을 저장하는 등 공급기능을 제공한다. 또한, 산림의 수자원함양이 증대되면 산사태 발생을 저감시키는 등 토사유실 감소로 하류 하천의 수질 보전 및 인공댐에 담수 되는 물을 깨끗하게 할 수 있다(Lee, 2007). 산림의 수자원함양기능을 증진하고 맑은 물 공급을 극대화하기 위해서는 물수지(water balance) 및 수자원함양에 관한 정량적 검토가 필요하다(Kim and Kim, 2004). 인위적인 벌목이나 가지치기, 봄철과 가을철 산불 등으로 인한 산림식생 파괴, 인공조림 등을 통한 새로운 식생을 조성하기 위해서는 수자원함양 기능의 계량화는 필수적이다. 전 국토 면적의 약 64%가 산림은 우리나라의 경우 가뭄과 홍수, 증발산, 침투, 유출로 이르는 다양한 수문현상이 복합적으로 나타나는 산림에서의 수문학적 연구는 매우 중요하다. 그러나 국내 산림의 수자원함양에 관한 평가는 주로 산림 수종 및 수령에 따른 증발산 연구(Kim, 1997; Han et al., 2003, Kim et al., 2004; Kim et al., 2005), 유출에 미치는 정성적, 정량적 영향 등에 관한 연구(Kim et al., 2003; 2004), 산림지에서 발생하는 유출과정을 단순화시켜 해석(Woo et al., 1998)하는 연구 등이 진행되어 왔다. 그러나 수자원함양 관련 다양한 연구가 진행되어 왔으나 산림의 영향을 보다 정량적으로 규명하기 위해서는 산림식생에 따른 지역적, 국가적 규모의 수문-생태학적 영향에 관한 연구, 장·단기적인 측면에서 수문학적 영향에 대한 연구와 산림지내의 정확한 물수지 해석이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 산림생태계 공급서비스 중 하나인 수원함양기능 계량화 방법에 관해 비교·분석 한 후 계량화 모형 적용가능성을 제시하고자 한다.

II. 연구 범위 및 방법

본 연구에서는 문헌조사를 바탕으로 산림의 수자원 공급기능 계량화에 대한 해외 모형들을 비교·분석한 후, 모형의 국내 적용 가능성을 판단하였다. 대상 모형은 AIM(AIM Project Team, 1996), ATEAM(ATEAM Project Team, 2004), CENTURY(Paron et al., 1987), (E)SWAT (Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2004), GUMBO (Boumans et al., 2002), InVEST(Natural Capital Project Team, 2008), PLM(Villa et al., 2004), SAVANNA(Coughenour, 1992), WaSSI (Sun et al., 2008), WaterGAP(Alcamo and Henrichs, 2002; Döll, 2002), WBM(Vörösmarty et al., 1989) 등이며, 모형의 구성, 규모(입출력인자) 등의 측면에서 비교·분석하였다. 다음으로 각 모형의 입·출력인자의 특성 파악을 통해 국가 및 지역 단위의 평가가 가능한지를 분석하였으며, 각 모형의 특징 및 입력인자 확보면에서 국내 적용 가능성을 살펴보았다.

III. 결과 및 고찰

1. 산림생태계 수자원 공급기능 관련 모형

산림의 수자원 공급기능 계량화 관련 모형은 강우-유출간 공간적 변화를 모의할 수 있는 수문모형(Hydrological model), 지역적 특성을 반영한 지역모형(Regional model), 통합평가모형(Integrated assessment model), 생지화학모형(Biogeochemical model) 등으로 구분할 수 있다(Tucker and Braat, 2009). 수문모형은 WaterGAP(Water-Global Assessment and Prognosis), (E)SWAT(Extended Soil and Water Assessment Tool), WBM(Water Balance Model) 등이 있으며, 유역의 각종 수문과정(hydrologic processes), 침투 및 차단, 지표수 유출과 지하수 유출 등 강우-유출간의 공간적 변화를 모의할 수 있다(Jang, 2003). ATEAM(Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis

and Modeling), InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) 등의 지역모형과 PLM(Patuxent Landscape Model), AIM(Asian Pacific Integrated Model: Water), GLBIO(Global Unified Metamodel of the BiOspher), WaSSI(Water Supply Stress Index) 등의 통합평가모형, 생태계 순환관련 CENTURY, SAVANNA(Landscape and Regional Ecosystem Model) 등의 생지화학모형도 수자원 공급기능을 계량화할 수 있다(Tucker and Braat, 2009; Table 1).

1) 입출력인자(구성)

각 모형은 입력인자와 그에 따른 출력인자를 가지고 있으며, 입력인자로는 기상학적 인자(온도, 강수량, 풍속, 태양복사 등), 토양인자(토양 이용, 토심, 수분함량, 토양증발 등), 지형 인자(경사, 방위) 및 사회·경제적 시나리오가 필요한 것으로 나타났다(Table 2). 인구밀도, 토지이용 정책 등 인간에 의한 간섭인자를 고려한 모형은 AIM, GUMBO, PLM, SAVANNA, WBM 등이 있다(Tucker and Braat, 2009). AIM 물 균형 모형(AIM Project Team, 1996)은 물수지 균형과 물 이동 요소로 이루어진 영향모형의 하부 모듈인 강우-유출과정 영향모형으로 다른 부분에 대한 기초적인 수문 정보를 제공하는 역할을 한다. 특히, 물 순환과정을 프로그래밍한 것으로 표면 유출, 토양 습윤도, 증발산, 하도 유출의 격자화 된 고해상도의 자료를 만들어 낼 수 있다. ATEAM 모형(ATEAM Project Team, 2004)은 광역척도(macro-scale) 수문모형으로 실측자료가 아닌 공간자료를 이용하여 기후 및 토지이용 변화에 따른 물수지 변화를 예측할 수 있다. CENTURY 모형(Paron et al., 1987; Ojima et al., 1993)은 초기 초지를 대상으로 개발되었으나, 확장 모델이 계속 개발되면서 산림, 농경지, 열대초원까지 적용가능하며, 월 단위 기후 자료와 산불, 초식(grazing) 등 토지이용 및 관리 자료가 필요하다. CENTURY 모형은 기후변

Table 1. Characteristics of the models for water provisioning services.

Model	Characteristic	Analysis	Type	Country	Year	Developer
AIM (Water)	- Assess effects of policies on climate change and resource supply	D	I	Japan	1996	AIM Project Team
ATEAM	- Link between ecosystem service provision and land use	L	R	EU	2004	ATEAM Project Team
CENTURY	- C, N, P, and S dynamics through an annual cycle over time scales of centuries and millennia	Eq	B	USA	1987	Parton et al.
(E)SWAT	- Scale of sub-watersheds calculation and daily time steps	Em	H	USA	1998	USDA Agricultural Research Service
GUMBO	- Integrated earth system simulation and dynamics, ecosystem services valuation	D	I	USA	2000	Boumans et al.
InVEST	- Enables global assessment of ecosystem services and resolution flexible	Em	R	USA	2008	Natural Capital Project Team
PLM	- Land use effects on ecosystem services (linked ecological economic model)	D	R	USA	1997	Villa
SAVANNA	- Management in grassland, shrubland, savanna and forested ecosystems	P	B	USA	1992	Coughenour
WaSSI	- Predicts the availability of water and other ecosystem services (Web-based model)	P	I	USA	2011	US Forest Service
WaterGAP	- Used in various global and continental resource assessment	Em	H	Germany	1996	CESR
WBM	- Water cycle calculation and daily time steps, output on annual basis	Em	H	USA	1998	Water System Analysis Group

B: Biogeochemical model, D: Dynamic systems model, Em: Empirical-statistical model, Eq: Equilibrium model, G: Growth based model, H: Hydrological model, I: Integrated assessment model, L: Land use meta-model, P: Process based model, R: Regional model

화 또는 토지이용 변화가 생태계에 미치는 영향을 분석할 수 있으며, 물수지, 토양수분, 토양 유기물 함량 등을 예측할 수 있다(Ojima et al., 1993). (E)SWAT 모형(Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2004)은 SWAT 모형보다 정교한 해석을

위해 계산시간단위를 일보다 작은 단위로도 모의할 수 있게 개선된 모형으로 다목적 함수형 자동보정 기능을 가지고 있다. GUMBO 모형(Boumans et al., 2002)은 토지 및 물 이용과 세계 총생산(Gross World Product. GWP) 등의 경

제자료가 필요하며, 11개 생태계 서비스에 관한 물리적·금전적 가치를 산출할 수 있다. InVEST 모형(National Capital Project)은 증발산량과 토양 깊이 등의 자료가 필요하며, 평균 수원함양량을 모의할 수 있다. InVEST 모형은 사용자 임의로 공간해상도를 설정할 수 있어, 지역적, 광역적 규모의 문제를 모의할 수 있다. PLM 모형(Villa et al., 2004)은 경사, 표고 등 다양한 변수를 이용하여 토지이용 등의 인간활동과 생태적 과정을 GIS(Geographic Information Systems) 기반 공간모델에서 단위모형(unit model)에 적용, 수원함양, 수질, 서식지 유형 등을 모의할 수 있다. SAVANNA 모형(Coughenour, 1992)은 경사, 토양도, 토지피복, 산불 등의 주요 인자를 바탕으로 초지, 관목, 사바나 및 산림생태계 관리기능을 모의할 수 있다. WaSSI 모형(Sun et al., 2008; Lockaby et al., 2011; Averyt et al., 2011)은 통합 과정기반 모형(integrated, process-based model)으로 기후 자료, 토지 및 물 이용 자료가 필요하며, 생태계 서비스에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 그러나 WaSSI 모형은 미국, 멕시코, 르완다 및 부룬디만을 대상으로 육상생태계 물공급 체계를 모의할 수 있다. WaterGAP 모형(Alcamo and Henrichs, 2002; Döll, 2002)은 기후요소, 토지이용, 관개, 인구 등의 자료를 이용하여, 물 흐름, 저장(지표유출, 지하수 충전, 강방류, 토양에 저장되는 물, 지하수와 지표수계)와 물사용(관개, 축산, 가정, 지역발전, 산업)을 모의할 수 있다. 또한, WaterGAP 모형은 인구학적, 사회경제적, 기술적 변화가 물의 사용에 미치는 영향, 기후변화와 이용가능한 물의 양의 변화 등을 고려하여 모의할 수 있으며, 유역 규모에서 이용되는 수량 및 가용성을 모두 계산할 수 있다. WBM 모형(Vörösmarty et al., 1989)은 토지피복, 인구 등의 자료가 필요하며, 생물다양성, 농업, 산림, 수자원 및 탄소흡수(carbon sequestration) 등의 취약성을 지도할 수 있다 (Metzger et al., 2004).

2) 규모

본 연구에서 분석한 모형들의 공간해상도는 0.5°에서 200m까지 다양하게 분석할 수 있으며, 그 규모에 따라 서로 다른 범위의 수원함양기능을 모의하였다. 전지구 규모보다는 유역 중심 지역(regional)단위 분석모형으로 ATEAM, CENTURY, (E)SWAT, InVEST, PLM, SAVANNA 모형이 이에 해당한다(Table 2). 국토면적이 좁은 우리나라와 같은 지역의 경우 전지구적인 모형보다는 지역단위 모형을 적용하는 것이 선행되어야 한다.

3) 국내 입력자료 확보 가능성

국내에 적용 가능한 모형을 구축하기 위해서는 기후·지형적 인자, 토지이용 등의 입력인자와 GIS 주제도, 위성자료, 사회·경제적 영향 자료 등이 필요하다(Table 3). 검토된 모형들에서 필요한 자료 중 대기관련 자료는 대기압, 운량, 온실가스, 습도, 강수량, 복사량, 온도, 풍속자료가 필요하며, 기상청, 국립기상연구소, 한국환경공단, 국가수자원관리종합시스템에서 제공하는 자료를 이용하여 구축 가능하다. 자연재해관련 자료 중 산불관련 자료는 산림청과 국가통계포털에서 제공하는 기 구축된 자료로 이용가능하다. 지형관련 자료는 토지피복, 방위, 경사관련 자료가 필요하며, 환경부, 국토교통부 국토지리정보원 자료를 이용할 수 있다. 토양관련 자료는 토양유실, 증발산, 뿌리 깊이, 유출량 등의 자료가 필요하며, 산림청, 농촌진흥청 국립농업과학원 및 흙토람 등에서 제공하는 기 구축된 자료와 위성사진을 이용하여 구축할 수 있다. 수자원 관련 자료는 수원함양, 지하수면깊이가 필요하며, 산림청, 한국지질자원연구원, 한국농촌공사에서 제공하는 자료와 문헌자료를 바탕으로 이용가능하다. 관리(management)관련 자료는 전기생산, GWP, 토지이용관리, 인구, 인적 관리, 사회·경제시나리오 자료가 필요하며, 세계은행, 국가통계포털, 환경부, 기상청 등에서 제공하는 자료와 문헌자료를 이용하여 구축가능하다.

Table 2. Input and output factors of the models.

Model	Input factors	Output factors	Scale	Resolution	Reference
AIM (Water)	<ul style="list-style-type: none"> - Coverage (%) - Water supply capacity (m³/d) - Initial cost - Operational and Maintenance cost - Managerial efficiency - Water quality - Use consistent with socioeconomic scenarios - Governmental policies - Climatic factors: air temperature, specific humidity, air pressure, wind speed, shortwave radiation, long wave radiation, precipitation 	<ul style="list-style-type: none"> - Watershed water stress (%) - Water Availability: river discharge, groundwater recharge - Water withdrawals 	G	0.5°	AIM Project Team (1996)
ATEAM	<ul style="list-style-type: none"> - Socioeconomic factors - Atmospheric greenhouse gas concentrations - Climatic factors - Land use - Runoff quantity - Runoff seasonality - Water resources per capity - Drought runoff - Flood runoff 	<ul style="list-style-type: none"> - Water supply vulnerability map: change in average annual runoff, drought runoff - Mean monthly runoff (km³/mon) 	R	10°	ATEAM Project Team (2004)
CENTURY	<ul style="list-style-type: none"> - Climatic factors: monthly average maximum, minimum air temperature, monthly precipitation - Site conditions - Land use/management (including fire, grazing, fertilization, irrigation, crop rotations, tillage practices) - Water table depth 	<ul style="list-style-type: none"> - Water balance - Soil water - Decomposition - Soil Organic Carbon (SOC) - Grass, tree and crop production - CO₂ flux, C, N, P and S balance 	N, R	Not spatially explicit	Parton et al. (1987)
(E)SWAT	<ul style="list-style-type: none"> - Land use (including details on management), - Topography - Soil - Sub-hourly precipitation - Infiltration - Runoff - Erosion loss 	<ul style="list-style-type: none"> - Runoff - Sediment yield - Deep aquifer recharge 	R	sub-water-sheds	Arnold et al. (1998), Neitsch et al. (2004)
GUMBO	<ul style="list-style-type: none"> - Land and water use data - Human population and GWP economic goods and services changes (economic investments, consumption) 	<ul style="list-style-type: none"> - Dynamics of 11 major ecosystem goods and services for each of the biomes 	G	Not spatially explicit	Boumans et al. (2002)

Table 2. Continued.

Model	Input factors	Output factors	Scale	Resolution	Reference
InVEST	<ul style="list-style-type: none"> - Land use/land cover (LULC) - Mean annual precipitation - Mean annual reference evapotranspiration - Plant available water content - Evapotranspiration coefficient - Root depth - Effective soil depth - Seasonality factor 	<ul style="list-style-type: none"> - Mean annual water yield - Mean annual water yield available for hydropower production 	N, R	30m	National Capital Project
PLM	<ul style="list-style-type: none"> - Human land use policies (socio-economic) - Land management (N input) - Climatic factors: precipitation, temperature, wind speed, humidity 	<ul style="list-style-type: none"> - Land use pattern - Water quality - Net primary productivity (NPP) - Water cycle - Soil nutrients - Land prices based on surroundings 	R	200m	Villa et al. (2004)
SAVANNA	<ul style="list-style-type: none"> - Elevation map - Soil map - Climatic factor: monthly precipitation - Vegetation type - Topology - Human management (stocking densities) - Fire 	<ul style="list-style-type: none"> - Water cycling (runoff deep drainage) 	N, R	100~1,000 grid cells	Coughenour (1992)
WaSSI	<ul style="list-style-type: none"> - Soil Properties - Land cover distribution - Leaf Area Index (LAI) - Mean Watershed Elevation - Total Withdrawals - Groundwater Withdrawals - Return Flow Percentage - Climatic data - Impervious Cover 	<ul style="list-style-type: none"> - Water Balance - Ecosystem Productivity - Water Supply and Demand (US only) 	N, R	County format	Sun et al. (2008), Lockaby et al. (2011), Averyt et al. (2011)
WaterGAP	<ul style="list-style-type: none"> - Climatic factors: precipitation, temperature, radiation - Irrigated areas - Land cover(livestock density, area irrigated) - Population size - National estimates of domestic and industrial use 	<ul style="list-style-type: none"> - Water withdrawal - Water availability (discharge, annual renewable water resources) - Annual water availability (surface runoff and total dis-charge) 	G, N, L	0.5°	Alcamo and Henrichs (2002), Döll, (2002)
WBM	<ul style="list-style-type: none"> - Climatic factors: precipitation, temperature, relative humidity, wind speed, diffuse solar radiation, cloud cover - Surface cover - Population - Irrigated area 	<ul style="list-style-type: none"> - Sustainable water use - Water use/withdrawal (agriculture, domestic, industry) vs water discharge 	G	0.5°	Vörösmarty et al (1989)

G: Global, N: National, R: Regional. L: Local

Table 3. Availability of input data for quantifying water storage function to Korea.

Class	Applicable input factors	Possibility	Source
Atmospheric	- Atmospheric pressure	O	Aerial photography
	- Cloud cover	O	KMA
	- GHG	O	KECO
	- Humidity	O	KMA, NIMR, WAMIS
	- Precipitation	O	KMA, NIMR, WAMIS
	- Radiation	O	KMA, NIMR, WAMIS
	- Temperature	O	KMA, NIMR, WAMIS
	- Wind speed	O	KMA, NIMR, WAMIS
Natural hazard	- Fire	O	KOSIS, KFS
Topography	- Aspect	O	NGII
	- Land cover	O	MEV
	- Slope	O	NGII
Soil	- Erosion loss	O	KFS, RDA
	- Evapotranspiration	O	Aerial photography, KMA
	- Infiltration	O	NAAS, USDA
	- Root depth	O	KFS
	- Runoff	O	WIS
	- Soil	O	SGIS, FAO, Hong et al.(2010)
Water	- Water availability	O	KFS, KIGAM, Kim et al.(2007; 2010)
	- Water table depth	O	KRC
Management	- Electricity production	O	WB
	- GWP	O	Statista Inc., WB
	- Human management	O	KOSIS
	- Land use management	O	MEV
	- Population	O	KOSIS
	- Socioeconomic scenarios	O	KMA, Lee et al.(2011)

FAO: Food and Agriculture Organization, KECO: Korea Environment Corporation, KFS: Korea Forest Service, KIGAM: Korean Institute of Geoscience and Mineral Resources, KMA: Korea Meteorological Administration, MEV: Ministry of Environment, KOSIS: Korean Statistical Information System, KRC: Korea Rural Community Corporation, NAAS: National Academy of Agricultural Science under Rural Development Administration, NGII: National Geographic Information Institute, NIMR: National Institute of Meteorological Research, RDA: Rural Development Administration, SGIS: Soil Groundwater Information System under Ministry of Environment, USDA: U.S. Department of Agriculture, WAMIS: Water Management Information System, WB: World Bank, WIS: Water Information System

기후, 토양, 식생, 지형학적 인자들의 경우 기상청, 환경부, 산림청, 농촌진흥청 등에서 확보 가능한 인자로 나타났으나, 인간에 의한 간섭 또는 사회·경제적 영향 자료는 인구, GDP 성장률, 산업구조, 토지이용 변화 등 주요 지표의 미래 상황에 대한 시나리오를 국내외 온실가스 전망에 사용되는 주요 전망 자료에 근거하여 개발·적용해야 한다(Lee et al., 2011). 유출량(runoff) 및 유량자료는 수문관측을 통하여 얻을 수 있지만, 국내 유량자료를 산정할 수 있는 수문 관측소의 수가 제한적이고, 관측 자료의 신뢰성 또한 낮은 편이다(Kim, 2001). 필요한 지점에서 유출량 관측자료가 존재하지 않거나 관측기록이 짧아 자료 가용성 측면에서 불가능한 경우가 많으며, 유출량을 측정하는 것도 비경제적으로 산림의 유출기작을 분석하기 위한 자료는 매우 제한적이다(Park, 1995; Jang, 2003).

2. 검토 모형의 국내 적용 가능성

최근, 국내에 적용된 수자원 공급 예측 모형 관련 연구로는 WBM(Combalicer et al., 2008), SWAT(Kim and Kim, 2004)모형 등이 있다. Combalicer et al.(2008)은 우리나라 남부지역 산림유역 물수지를 하천 유량, 증발산량, 지하수 유출 등을 이용하여 WBM과 산림수문모형인 BROOK90 모형에 기반을 두어 유출량을 추정하였다. 그 결과 연간 강수량의 약 46%가 증발산으로 손실되고, 39%는 하천 유출, 15%는 침윤 손실되는 것으로 나타났다. Kim and Kim (2004)은 SWAT 모형 내 식생 알고리즘을 수정하여 산림식생에 따른 유역 물수지 영향 평가를 수행한 결과 침엽수보다 활엽수의 총 유출이 증가한다고 평가하였다. SWAT 모형을 국내 산림에 적용한 연구의 경우 토지이용도와 토양도를 활용하여 HRU(Hydrological Response Unit)를 작성하는 관점에서 이루어졌다(Jang et al., 2003; Heo et al., 2005; Kim et al., 2006; Park et al., 2008). 특히, 국내 산림에 적용한 모형의 경우

필요한 대부분 입력자료 확보 측면에서 소유역 또는 광릉슈퍼사이트를 대상으로 토지이용도와 토양도를 활용하여 개념적 평가가 이루어 졌다(Park, 2009).

국내 입력자료 가능성(Table 3)과 MA(2005), TEEB(2010) 등의 생태계 서비스 유형 및 기능을 반영한 계량화 및 가치평가와 연계할 수 있는 모형을 Table 4와 같이 도출하였다. 그 결과, 다양한 수문학적 실험이 진행되고 있는 슈퍼사이트를 제외한 지역의 국내 입력자료 가용성이 낮은 우리나라와 같은 상황에서는 주 입력자료가 기후자료인 InVEST, WaterGAP 모형이 다른 모형들보다 국내 적용 가용성이 높은 것으로 나타났다. 검토된 모형들의 입력자료는 모형의 유형에 따라 차이가 나타났으며, AIM, ATEAM, GUMBO, PLM, SAVANNA 모형은 인구학적, 사회경제적 영향과 연관된 과정들을 모의하고 입력자료의 요구수준이 InVEST, WaterGAP 모형보다 더 높게 나타났다. InVEST 모형의 경우 공급, 조절, 문화, 지원서비스에 관한 계량화와 함께 현재 제공되거나 미래 토지이용 변화에 따라 제공되는 생태계 서비스의 양과 가치를 추정할 수 있다. 그러나 해외에서 개발된 모형들을 국내에서 제대로 적용하기 위해서는 국내 산림 특성에 맞게 매개변수(parameter)를 조정하는 과정이 필요하며, 국내 실정에 맞게 보정할 수 있는지에 따라 모형의 국내 적용 가능성이 달라질 수 있다(Lee et al., 2010). 모형에서 요구하는 입력자료가 갖추어지지 않으면 모형 적용이 불가능하고 모형 성능 평가 및 지역적 보정도 가능하기 어렵기 때문에 국내 적용 가능성 평가에서는 모형에서 요구하는 입력자료를 국내 자료를 이용하여 충족시킬 수 있는지가 가장 중요하다(Kim et al., 2009; Lee et al., 2010).

3. 가치평가와의 연결성

생태계 서비스 계량화 결과는 생태계 서비스의 경제적 가치(economic value) 평가에 활용될

Table 4. Applicability of the models for ecosystem services quantification to Korea.

Model	Data availability	ES classification	ES coverage	Economic valuation
AIM (Water)	×	×	Provisioning, regulating	×
ATEAM	×	×	Provisioning, regulating, habitat/supporting	×
CENTURY	△	×	Provisioning	×
(E)SWAT	△	×	Provisioning	×
GUMBO	×	×	All	Marginal product of ecosystem services
InVEST	○	MA, TEEB	All	Per hectare market values
PLM	×	×	Provisioning, cultural	Aesthetic value (house prices)
SAVANNA	×	×	Provisioning, supporting	×
WaterGAP	○	MA	Provisioning	Water scarcity
WBM	△	×	Provisioning	Costs and benefits of management practices

×: poor available, △: partially available, ○: good available

수 있다. 이를 위해서는 계량화된 단위정보가 가치평가를 위해 활용 가능한 형태여야 한다. 검토된 모델들 중 국내 적용가능한 InVEST 모형의 경우 출력결과인 소유역(catchment)당 저장할 수 있는 저장량, 물 소비량 및 물 부족량 등의 톤(ton) 단위를 바탕으로 경제적 가치를 평가할 수 있다. 특히, InVEST 모형은 반복적인 과정으로 모의되기 때문에 경제적 가치평가와 함께 자연자산 관리 방안에 관한 새로운 계획을 계속적으로 모의할 수 있다. 그러나 일정한 지역의 생태계 서비스 가치는 경제적 가치와 자연보호구역 위치, 토지피복, 도로로부터 거리 등 주변 지역의 특성과 접근성에 따라 달라질 수 있으므로(Koo et al., 2013), 산림생태계 현황자료와 대표성을 띠는 자료(representative data) 유무, 구동모형 출력결과가 가치평가를 할 수 있는 단위가치 형태인지 등에 관한 검토가 추가적으로 필요하다.

IV. 결 론

산림은 강우에 따른 유출, 증발산, 침투 유출 등에 따른 수문현상이 복합적으로 나타나며, 산림유역은 생물종다양성, 서식처 및 이동통로로서 생태계의 연속성 및 연결성을 유지하고 있다. 그러나 산림 임목밀도는 차단손실량에 직접적으로 영향을 미쳐 임목밀도 증가는 강우 차단량 증가, 증발산량 증가, 홍수, 산사태 등 발생 증가의 원인이 될 수 있으며, 수자원함양 기능을 저해하는 요소로 작용할 수 있다. 산림 수자원의 효율적인 관리와 수자원함양기능을 효율적으로 발휘시키기 위해서는 산림과 수문현상, 강우-유출, 가뭄, 홍수 등의 관계에 대해 파악해야 한다. 특히, 적합한 모형과 자료를 이용하여 산림에 의한 물수지 변화를 정량적으로 규명해야 한다. 이에 본 연구에서는 산림 수자원 공급 서비스 가치평가 및 효율적 관리를 위해 해외

10개의 수자원 공급 예측 모형을 국내 수자원 공급서비스 계량화를 위해 적용 가능성을 분석하였다. 그 결과 기존 해외 모형들의 특징, 이용 가능한 자료 및 분석 규모 등을 고려하여 국내 적용 가능한 수자원 공급서비스 계량화 모형으로 InVEST와 WaterGAP 모형을 선택하였다. 그러나 인구학적, 사회경제적 영향과 연관된 과정들을 모의하는 전 지구적 모형은 규모가 너무 커서 국토면적이 좁고 복잡한 지형인 우리나라에 적용하기에는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해서는 국내 지형적 특징을 반영할 수 있는 매개변수의 지역적 보정이 필요하며, 지형 조건과 자료의 공간적 한계를 극복할 수 있도록 원격탐사 및 GIS 기법 관련 향후 연구가 진행되어야 한다. 또한, 우리나라 지형에 적합한 국가 또는 지역 단위 모형을 구축해야 하며, 이때 기상, 토양, 식생간의 신뢰성 있는 장기자료가 함께 구축되어야 한다.

References

- Ahn SE. 2013. Definition and Classification of Ecosystem Services for Decision Making. *Journal of Environmental Policy*, 12(2): 3-16. (in Korean)
- AIM Project Team. 1996. An Estimation of a Negotiable Safe Emissions Corridor based on the AIM Model - Preliminary Study -. AIM Interim Paper, IP-03.
- Alcamo, J. and Henrichs, T. 2002 Critical regions: a model-based estimation of world water resources sensitive to global changes. *Aquatic Sci.* 64: 1-11.
- Arnold, J. G. Srinivasan, R. Muttiah, R. S. and J. R. Williams. 1998. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *J. American Water Resour. Assoc.* 34(1): 73-89.
- ATEAM Project Team. 2004. *Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis and Modelling: Final Report, Section 5 and 6 and Annex 1 to 6.* http://www.pik-potsdam.de/ateam/ateam_final_report_sections_5_to_6.pdf (Accessed: 2010. 10.29.)
- Averyt, K. · Fisher, J. · Huber-Lee, A. · Lewis, A. · Macknick, J. · Madden, N. · Rogers, J. and Tellinghuisen, S. 2011. *Freshwater use by U.S. power plants: Electricity's thirst for a precious resource, A report of the Energy and Water in a Warming World initiative.* Cambridge, MA, Union of Concerned Scientists, Available at: http://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/energy-and-water-use/freshwater-use-by-us-power-plants.html.
- Boumans, R. · Costanza, R. · Farley, J. · Wilson, M. A. · Portela, R. · Rotmans, J. · Villa, F. and M. Grasso. 2002. Modeling the Dynamics of the Integrated Earth System and the Value of Global Ecosystem Services Using the GUMBO Model. *Ecological Economics* 41: 529-560.
- Combalicer, E. A. · Lee SH · Ahn S · Kim DY and Im, S. 2008. Modeling Water Balance for the Small-Forested Watershed in Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 12(5): 339-348.
- Costanza, R. · D'Arge, R. · de Groot, R. S. · Farber, S. · Grasso, M. · Hannon, B. · Limburg, K. · Naeem, S. · O'Neill, R. V. · Paruelo, J. · Raskin, R. G. · Sutton, P. and van den Belt, M. 1997. The value of world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387: 253-260.
- Coughenour, M. B. 1992. Spatial modelling and landscape characterization of an African pastoral ecosystem: a prototype model and

- its potential use for monitoring drought. In: D. H. McKenzie, D. E. Hyatt, and V. J. McDonald (EDS.). *Ecological Indicators*, Vol. 1. New York, NY: Elsevier Applied Science, 787-810.
- Daily, G. C. 1997. *Nature's Services Societal Dependence On Natural Ecosystems*. Island Press, Washington DC.
- de Groot, R. S. · Wilson, M. A. and Boumans, R. M. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services, *Ecological economics*, 41(3): 393-408.
- Döll, P. 2002. Impact of climate change and variability on irrigation requirements: A global perspective. *Climatic Change*, 54(3): 269-293.
- Egoh, B. · Drakou, E. · Dunbar, M. B. · Maes, J. and Willeman, L. 2012. Indicators for mapping ecosystem services: a review. *EUR 25456 EN*.
- Han JY · Kim SH and Kim, NW. 2003 The Resolution of the Digital Terrain Index for the Prediction of Soil Moisture. *Journal of Korea Water Resources Association*, 36(2): 251-261. (in Korean)
- Heo SG · Kim KS · Sagong M · Ahn JH and Lim JJ. 2005. Evaluation of SWAT Applicability to Simulate Soil Erosion at Highland Agricultural Lands. *Journal of Korean Society of Rural Planning*, 11(4): 67-74. (in Korean)
- Hong SY · Minasny, B. · Zhang YS. · Kim YH and Jung KH. 2010. Digital soil mapping using legacy soil data in Korea. *International Union of Soil Sciences (IUSS)*. c/o Institut für Bodenforschung, Universität für Bodenkultur, pp. 5-8.
- IIEP, Alterra, Ecologic, PBL, and UNEP-WCMC. 2009. Scenarios and models for exploring future trends of biodiversity and ecosystem services changes. Final report to the European Commission, DG Environment on Contract ENV.G.1/ETU/2008/0090r. Institute for European Environmental Policy, Alterra Wageningen UR, Ecologic, Netherlands Environmental Assessment Agency, United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre.
- Jang CH · Kim HJ and Kim NW. 2003. Estimate Yongdam-dem Basin of Long-range Runoff Using AVSWAT 2000. *Proceeding of Korea Water Resources Association 2003*, 46-49. (in Korean)
- Jang JS. 2003. Introduction of Hydrologic Models and Parameters. *Journal of Korean National Committee on Irrigation and Drainage*, 10(1): 95-102. (in Korean)
- Jung YH · Choi HT · Yoo JY and Kim, KH. 2009. A Study on Water Environment Change of Watershed in Forest Practice Area. *Korea Forest Research Institute*. (in Korean)
- Kim CG and Kim NW. 2004. Assessment of Forest Vegetation Effect on Water Balance in a Watershed. *Journal of Korea Water Resources Association*, 37(9): 737-744. (in Korean)
- Kim CY · Kim SH · Jeong SW and Kim W. 2004. Development of Soil Moisture Monitoring System for Effective Soil Moisture Measurement for Hillslope Using Flow Distribution Algorithm and TDR. *Journal of Korea Water Resources Association*, 37(1): 31-41. (in Korean)
- Kim GH · Jeong YH · Jeong CG · Jeon JH and Yu JY. 2003. The Impacts of Forest Type on Peak Flows in Long-term Hydrological Data at Three Small Forested Catchments. *Journal of Korean Forestry Society*, 92(5): 462-469. (in Korean)

- Kim HJ. 2001. Development of two-parametric hyperbolic model for daily streamflow simulation. Ph.D. thesis, Seoul National University, pp. 1-3. (in Korean)
- Kim JC · Jeong JH · Kim SH · Shim WB · Ryu JH · Kim JS · Seo SA and Yoo BO. 2009. The 4th Forest Resource Monitoring Survey in Korea. Korea Forest Research Institute. (in Korean)
- Kim JH · Kim JJ · Jun JH · Son YM · Kim KH · Yoon HJ · Park CY and Lee SW. 2007. A Study on the Estimation and the Evaluation Methods of Public Function of Forest. Korea Forest Research Institute. (in Korean)
- Kim JH · Kim KD · Kim RH · Park CR · Youn HJ · Lee SW · Choi HT and Kim JJ. 2010. A Study on the Estimation and the Evaluation Methods of Public Function of Forest. Korea Forest Research Institute. (in Korean)
- Kim, K. H. · Kim, S. H. · Kim, H. S. and W. Kim. 2005. Establishment and Operation of a Soil Moisture Monitoring System Considering Temporal and Spatial Features of Representation. Journal of Korea Water Resources Association, 38(1): 73-82.
- Kim KH · Jeong YH · Jeong CG · Jun JH and Yoo JY. 2004. Effects of Thinning and Pruning on Canopy Storage Capacity, Net Rainfall and Interception Loss in Pinus koraiensis and Abies holophylla Plots. Journal of Korean Forestry Society, 93(7): 453-463. (in Korean)
- Kim NW · Jung IM and Woon YS. 2006. An Integrated Surface Water-Groundwater Modeling by Using Fully Combined SWAT-MODFLOW Model. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 26(5B): 481-488. (in Korean)
- Kim S. 1997. Development of a monthly Runoff Model, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology. (in Korean)
- Kim SA · Lee WK · Son Y · Cho Y and Lee MS. 2009. Applicability of Climate Change Impact Assessment Models to Korean Forest. Journal of Korean Forestry Society, 98(1): 33-48. (in Korean)
- Koo MH · Lee DK and Jung TY. 2013. A Study on the Contexts of Ecosystem Services in the Policymaking Process. Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology, 15(5): 85-102. (in Korean)
- Lee AR · Yi K · Son Y · Kim RH · Kim CS · Park GS · Lee KH and Yi MJ. 2010. Approaches for Developing a Korean Model Through Analysis of Overseas Forest Soil Carbon Models. Journal of Korean Forestry Society, 99(6): 791-801. (in Korean)
- Lee H · Chae YR · Kim YG · Cho GW · Lee Y · Kim YJ and Bae HJ. 2011. Economic Analysis of Climate Change in Korea. Ministry of Environment. (in Korean)
- Lee MK. 2007. Opportunity Cost for Increasing Watershed Conservation Function of Forest - A Case Study of Suelo Dam Catchment Area in Mt. Baekun Jeollanamdo -. MA thesis, Seoul National University. (in Korean)
- Lockaby, G. · Nagy, C. · Vose, J. M. · Ford, C. R. · Sun, G. · McNulty, S. · Caldwell, P. · Cohen, E. and Moore Myers, J. A.: Water and Forests, in Wear D. N., and Greis J. G. 2011. The Southern Forest Futures Project: Technical Report, USDA Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC., General Technical Report. Available at: <http://www.srs.fs.usda.gov/futures/>
- MA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. Ecosystems and Human Well-being. Millenni-

- um Ecosystem Assessment. Island Press. Washington DC.
- Metzger, M. J., Leemans, R., Schröter, D., Cramer, W. and ATEAM Consortium. 2004. The ATEAM vulnerability mapping tool. Quantitative Approaches in Systems Analysis No. 27. Office C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology & Resource Conservation (PE&RC), Wageningen, The Netherlands, CD-ROM Publication.
- Neitsch, S. L. · Arnold, J. G. · Kiniry, J. R. · Srinivasan, R. and J. R. Williams. 2004. Soil and Water Assessment Tool Input / Output File Documentation. Ver. 2005. Temple, Tex.: USDA-ARS Grassland Soil and Water Research Laboratory.
- Ojima, D. S. · Parton, W. J. · Schimel, D. S. · Scurlock, J. M. and Kittel, T. G. 1993. Modelling the effects of climatic and CO₂ changes on grassland storage of soil-c Terrestrial Biospheric Carbon Fluxes. Springer Netherlands, 643-657.
- Park JC. 2009. A Study on the Application of the National GIS and Environmental Observation Data for Assessment of Regional Water Balance: A Case of the Catchment of Guryang Stream. Journal of the Korean Geographical Society, 44(4): 557-576. (in Korean)
- Park JY · Lee MS · Lee YJ and Kim SJ. 2008. The Analysis of Future Land Use Change Impact on Hydrology and Water Quality Using SWAT Model. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 28(2B): 187-197. (in Korean)
- Park SW. 1995. Applied Hydrology. Hyangmoon Publishing Co. (in Korean)
- Parton, W. J. · Schimel, D. S. · Cole, C. V. and Ojima, D. S. 1987. Analysis of factors controlling soil organic levels of grasslands in the Great Plains. Soil Science Society of America Journal, 51: 1173-1179.
- Smart, S. M. · Pearce-Higgins, J. P. · Wright, L. J. · Comber, A. J. · Howard, D. C. · Maskell, L. C. and Jones, M. L. M. 2012. Exploring the Future: Phase 1 - scoping current and future use of spatial Decision Support Tools (sDST) for integrated planning for land-use, biodiversity and ecosystem services across England. Defra, London.
- Sun, G. · McNulty, S. G. · Moore Myers, J. A. and Cohen, E. C. 2008. Impacts of Multiple Stresses on Water Demand and Supply across the Southeastern United States. Journal of American Water Resources Association, 44(6): 1441-1457.
- TEEB. 2010. The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations, Editor: Kumar P. Earthscan, London and Washington.
- Tucker, G. and Braat, L. C. 2009. Scenarios and models for exploring future trends of biodiversity and ecosystem services changes, Institute for European Environmental Policy (IEEP).
- UK NEA (National Ecosystem Assessment). 2011, The UK National Ecosystem Assessment Technical Report, UNEP-WCMC, Cambridge.
- Vandewalle, M. · Sykes, M. T. · Harrison, P. A. · Luck, G. W. · Berry, P. · Bugter, R. · Dawson, T. P. · Feld, C. K. · Harrington, R. · Haslett, J. R. · Hering, D. · Jones, K. B. · Jongman, R. · Lavorel, S. · Martins da Silva, P. · Moora, M. · Paterson, J. · Rounsevell, M. D. A. · Sandin, L. · Settele, J. · Sousa, J. P. and Zobel, M. 2009. Review paper on concepts of dynamic ecosystems and their services. The RUBICODE Project Funded

- under the European Commission Sixth Framework Programme (Contract Number: 036890).
- Villa, F. · Voinov, A. · Fitz, C. and Costanza, R. 2004. Calibration of Large Spatial Models: A multistage, multiobjective optimization technique. *Landscape Simulation Modeling Dynamic Systems*, Springer New York, 77-116.
- Vörösmarty, C. J., andFederer, C. A. and Schloss, A. 1989. Potential evaporation functions compared on U.S. watersheds: Implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling. *Journal of Hydrology*, 207: 147-69.
- Woo BM · Kim JS · Lee HH and Choi HT. 1998. The purpose of this study was to develop the Rainfall-Runoff Model for a long and short term runoff analysis in small forested mountain watersheds. *Journal of Korean Forestry Society*, 87(1): 11-19. (in Korean)