

Research Paper

## 그린워터 및 블루워터를 이용한 물부족 평가

김성은\* · 이동근\*\* · 양병선\*\*\* · 김예화\*\*\*\*

서울대학교 대학원\*, 서울대학교 조경지역시스템공학부\*\*,  
서울대학교 협동과정 조경학\*\*\*, 연변대학교 농학원\*\*\*\*

### Water Scarcity Assessment Using Green and Blue Water Concepts

Sung Eun Kim\* · Dong Kun Lee\*\* · Byung Sun Yang\*\*\* · Yihua Jin\*\*\*\*

Graduate School, Seoul National University\*

Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University\*\*

Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University\*\*\*

Agricultural College of Yanbian University\*\*\*\*

**요약** : 기후변화 및 인구 증가 등으로 인하여 물 공급량이 수요량을 충족하지 못하는 물부족 현상 발생이 증가하고 있다. 이와 같은 물부족 현상으로 인한 피해를 최소화하고 이에 대한 대비를 위해 수자원 및 물 부족 평가 연구가 꾸준히 이루어져 왔다. 하지만 기존 연구는 대부분 지상수와 지하수만을 공급량으로 보았으며 실제 식물의 성장 및 유지에 이용되는 토양수 등에 대한 고려는 이루어지지 않았다. 이에 본 연구에서는 지상수 및 지하수를 의미하는 블루워터와 식물성장 및 유지에 이용되는 그린워터 개념을 도입한 물부족 평가 방법을 제안하고 이를 이용하여 보령 지역을 대상으로 물부족 평가를 실시하였다. SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하여 대상구역의 월별 유출량, 지하수량, 토양수량, 증발산량을 도출하였으며 이를 이용하여 월별 그린워터와 블루워터 부족량을 각각 도출하였다. 그린워터와 블루워터의 물부족 평가 결과 이 둘의 양상이 매우 다르게 나타났으며 이에 수자원 관리에서 용수 공급에 특히 주의해야 하는 시기를 알 수 있었다. 본 연구에서 제안하는 물부족 평가 방법은 식물 및 작물 성장, 유지에 사용되는 그린워터를 평가에 고려함으로써 기존 평가 방법들에 비해 더욱 상세한 결과를 얻을 수 있으며 이에 수자원 관리에 도움이 될 것으로 판단된다.

**주요어** : 물 이용능, 수자원 안정성, 그린워터, 물발자국, SWAT, 기후변화

**Abstract** : With climate change and population growth, there are significant increases in water scarcity. There have been water security assessments to abate the gap between water demand and availability to support water resource management. However, most of the assessments are focusing

First Author: Sung Eun Kim, Graduate School, Seoul National University, Seoul, 08826, KOREA. E-mail: lamanzana@snu.ac.kr

Corresponding Author: Dong Kun Lee, Department of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, KOREA. E-mail: dkle7@snu.ac.kr

Co-Authors: Byung Sun Yang, Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University, Seoul, 08826, KOREA. E-mail: sunyang1005@snu.ac.kr

Yihua Jin, Agricultural College of Yanbian University, Jilin, CHINA, 133002. E-mail: yehwa88@163.com

Received: 30 November, 2017. Revised: 27 April, 2018. Accepted: 30 May, 2018.

on the water that flows through either on or below the land surface, failing to consider water that infiltrates and can be used by vegetation. This study presents water scarcity assessment accounting for Blue and Green water concept, and applied the method to Boryung region. Monthly streamflow, evapotranspiration, and soil moisture were estimated by SWAT modeling, and each of them was used to analyze Blue and Green water scarcity. Blue and Green water scarcity had different aspect, and the result indicated the time when water scarcity is more likely to happen. The water scarcity assessment framework presented in this paper provides novel assessment method integrating hydrologic and ecosystem aspects, thereby improving the understanding of how water resources should be managed.

Keywords : Water availability, Water security, Green water, Water footprint, SWAT, Climate change

## I. 서론

기후변화로 인하여 강우 패턴이 변화하고 이상기 후 현상과 가뭄 발생이 증가함으로써 물 공급에 차질이 생기고 있으며 인구 증가 등으로 인하여 물 수요는 증가하고 있다(Mishra & Singh 2010; Palmer & Raisanen 2002). 이에 전 세계적으로 물 부족 발생 가능성이 높아지고 있다. 물 부족은 물 수요가 공급을 초과하는 것으로, 농업, 환경, 산업 등 여러 분야에서 요구되는 물의 양이 공급의 부족 또는 수질 악화 등으로 충족되지 않는 경우 발생한다(Falkenmark et al. 1989; Van Loon & Van Lanen 2013).

물 부족 발생을 막기 위해서는 수요와 공급이 균형을 이루어야 하며 지속적인 수자원 관리가 이루어져야 한다. 한정적인 공급량을 이용하여 수요량을 충족하기 위해서는 물부족 평가를 통해 수자원 관리가 필요한 지역을 도출해야 하며 물부족 발생 가능성이 높은 시기를 파악하는 게 중요하다. 전 세계적으로 물 부족 평가의 중요성이 강조되고 있으며(Junguo Liu et al. 2017) 물부족 평가는 주로 지수를 이용하여 이루어진다.

물부족 평가 지수는 평가를 위하여 고려하는 변수, 수요의 종류 등에 따라 지수의 종류가 다양하다. Falkenmark et al.(1989)는 인구가 증가함 수자원 안정성을 평가하였다. Criticality Ratio는 이용 가능한 물과 물 이용량(취수량)의 비율로 수자원 안정성을 평가하며 이 지수는 주로 국가 이상의 공간 스케일을 대상으로 한다(Falkenmark 1997; Alcamo et

al. 2000). Water Poverty Index는 5가지 요소(water availability, access, capacity, use, environment)를 평가하여 각 요소 산출 결과를 합하여 평가하는 지수이다(Sullivan 2002; Sullivan et al. 2003). 이처럼 다양한 물부족 평가 지수가 있으며 이들은 주로 국가 또는 전 지구 스케일을 대상으로 하며 이들 평가 지수는 모두 하천 또는 지하수에서 공급되는 용수만을 평가 대상으로 한다.

국내에서는 유역의 장래 용수수요에 의한 순물소모량과 불규칙한 하천의 자연유량을 비교하는 물수지 분석을 통해 수자원 평가를 하였다(Kim & Jung 2001; Lee et al. 2017). 또한 강우-유출모형을 이용하여 도출된 유량을 이용하거나 미래 기후자료를 이용하여 미래 유량을 도출하여 물부족량을 산정하였다(Hwang et al. 2006; Ahn et al. 2013; Kim et al. 2013; Jung et al. 2015).

이처럼 현재까지 많은 물부족 평가 연구들이 이루어지고 있지만, 이들은 대부분 하천유량과 지하수량만을 평가 대상으로 하고 있다. 하지만 실제 농업이나 수목 생장 등에는 토양수가 큰 영향을 미치며 특히 산림과 농지가 많은 우리나라에서는 토양수를 포함한 물부족 평가가 더욱 중요하다.

따라서 본 연구에서는 블루워터와 그린워터의 개념을 도입하고, 유량, 지하수 뿐 아니라 토양수도 고려한 물부족 평가를 하였다. 워터풋프린트(Water Footprint)에서 나온 개념인 블루워터와 그린워터는 각각 기존의 물부족 평가에서 고려하던 용수량(유량, 지하수량)과 토양수라고 할 수 있으며 이들은 물의

이동이나 수자원 평가 연구에 이용된다(Rodrigues et al, 2014; Veettil and Mishra 2016). 블루워터란 지표 및 지하에 흐르거나 저장되는 담수로 저수지, 댐 등 각종 인프라 시설에 저장되어 공급되는 물을 말하며, 그린워터는 강수가 토양 및 식물에 저장되는 물로 토양수 및 증발산량을 이용하여 산출한다(Falkenmark & Rockstrom 2006; Falkenmark & Rockstrom 2010; Rodrigues et al, 2014; Hoekstra et al. 2011). 그린워터와 블루워터를 모두 고려한 물 부족 평가를 통해 지역의 토지 이용 및 특성에 적합한 통합적인 수자원 관리가 가능하다(Calder 2007). 특히 농지가 많은 면적을 차지하는 지역의 경우 그린워터가 부족이 발생할 경우 블루워터의 개입이 필요하므로 그린워터 부족을 평가함으로써 추가 관개가 필요한 시기를 파악할 수 있다. Rodrigues et al. (2013)은 두 개의 소유역을 대상으로 그린워터와 블루워터 부족을 각각 평가하였으며 Veettil and Mishra(2016)은 한 유역에 속하는 31개의 주의 그린워터와 블루워터를 평가하여 비교하였다.

본 연구에서는 수자원을 블루워터와 그린워터로 나누어 물부족을 평가하는 방법을 제시하고 금강 유역에 위치한 소유역을 대상으로 블루워터와 그린워터를 고려하여 물부족 평가를 하였다. 물부족 평가를

위하여 대상유역의 유출량을 모의하였으며, 모의 결과를 이용하여 블루워터 및 그린워터의 부족량을 각각 평가하였다(Figure 1).

## II. 연구 방법

### 1. SWAT의 개요

그린워터와 블루워터를 모두 고려한 수자원 안정성 평가를 위한 강우유출 모형으로 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형(Arnold et al, 1998)을 선정하였다. SWAT모형은 미국 농무성 농업연구소(United States Department of Agricultural Research Service, USDA-ARS)에서 개발한 물리적 기반의 준분포형 연속 수문모형이다. 이 모형은 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 토양, 토지 이용, 지형 등에 따른 유출의 영향을 예측하기 위해 개발되었으며 물수지 방정식에 근거를 두고 수문반응단위(Hydrologic Response Unites, HRUs) 별로 유출량의 모의가 가능하다(Arnold et al, 1996).

SWAT에서 모의되는 수문순환은 물수지 방정식에 근거하며, Eq. (1)과 같다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - W_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{Eq. (1)}$$

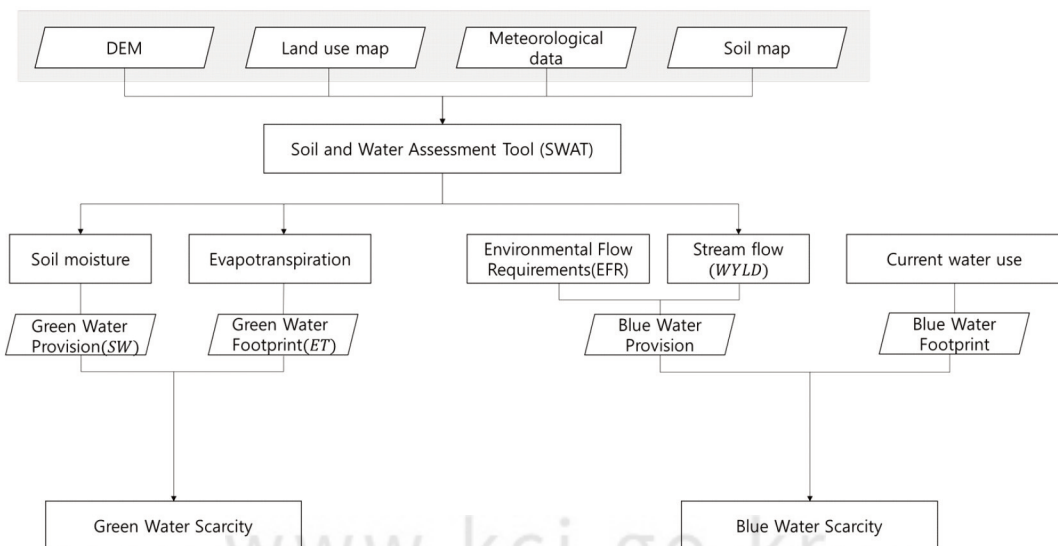


Figure 1. Study Flow.

여기에서  $SW$ 는 최종 토양수분량(mm),  $SW_0$ 는  $i$  일 동안의 초기토양수분량(mm),  $t$ 는 시간(days),  $R_{day}$ 는  $i$ 일 동안의 강수량(mm),  $W_{seep}$ 는  $i$ 일 동안의 표면유출량(mm),  $Q_{gw}$ 는  $i$ 일 동안의 침투량(mm), 는 일 동안의 회귀수량(mm)을 나타낸다. 토양수에 대하여 표현한 물수지 방정식인 Eq. (1)을 블루워터와 그린워터를 이용하여 유역에 유입되는 전체 강수량에 대하여 표현할 수 있으며 이는 Eq. (2)와 같다. 본 연구에서는 그린워터와 블루워터를 산정하기 위하여 위의 물수지 방정식을 Eq. (2)와 같이 보았으며(Van Griensven et al, 2012), 이 식을 통해 강수가 블루워터와 그린워터로 분류됨을 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Rainfall} = & \text{Evapotranspiration} + \text{Water Yield} + \\ & \Delta\text{Soil Storage} + \Delta\text{Groundwater Storage} + \\ & \text{Losses} \end{aligned} \quad \text{Eq. (2)}$$

“Water Yield”(WYLD)는 유출량으로 HRU에서 나와 하천으로 유입되는 총량을 가리키며 “Groundwater Storage”는 하천으로 유입되는 얇은 대수층의 수량( $GW_Q$ )와 지하수로 유입되는 물의 양( $GW_{RCH}$ )의 차이를 가리킨다. “Evapotranspiration”(ET)은 증발산량으로, 토양수의 유실을 나타내며 “Soil Storage”(SW)는 토양 내 저장되는 물의 양을 뜻한다. “Losses”는 증발산 이외의 원인으로 유실되는 물의 양을 의미한다(Schuol et al., 2008).

## 2. 대상유역

본 연구의 대상유역은 금강수계에 속하며 보령댐 유역을 포함한 총면적 232.64 km<sup>2</sup>인 소유역이다(Figure 2). 대상유역은 최근 잦은 가뭄으로 인한 문제가 발생하고 있는 지역으로 토지 피복의 절반 이상이 산림으로 이루어져 있어 그린워터 공급의 영향을 크게 받는 지역이다. 가뭄에 취약한 대상지의 월별 그린워터 및 블루워터를 도출함으로써 물부족을 평가하였으며 이를 이용하여 물부족 발생 가능성이 높은 시기를 도출하였다.

## 3. 입력자료

대상유역의 지형을 고려하기 위하여 USGS(United States Geographical Survey)에서 제공하는 DEM을 사용하였으며 토지이용과 토양의 특징을 반영한 유출량 산정을 위하여 토지피복도(2014)와 토양도(2010)를 사용하였다(Figure 3). 각 HRU의 표면유출량, 토양으로의 침투량, 증발산량 산정을 위하여 기상자료 중 최저, 최고기온(°C), 강수량(mm), 평균 풍속(m/sec), 상대습도(%), 일사량(MJ/m<sup>2</sup>) 자료를 사용하였다. 각 기상자료는 서산, 보령, 부여에 위치한 기상관측소 자료(2014–20116)를 사용하였다. 또한 모형의 보정(2014–2015)과 검증(2016)을 위해서 물정보포털(<http://www.water.or.kr>)에서 제공하

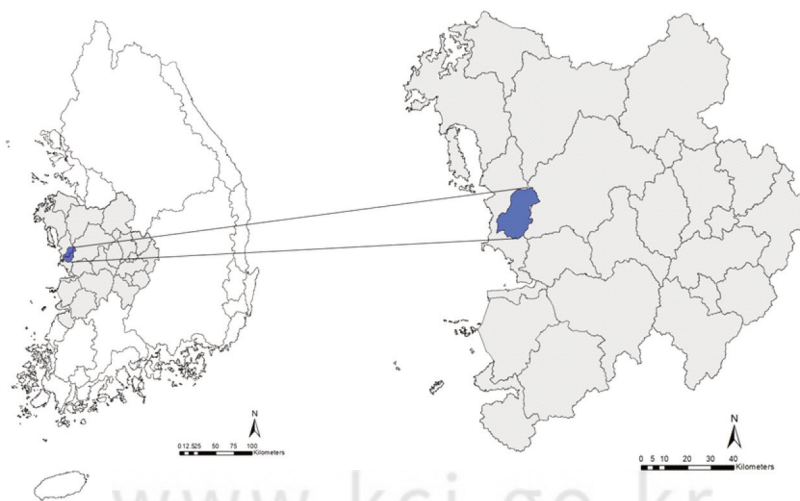


Figure 2. Study area.

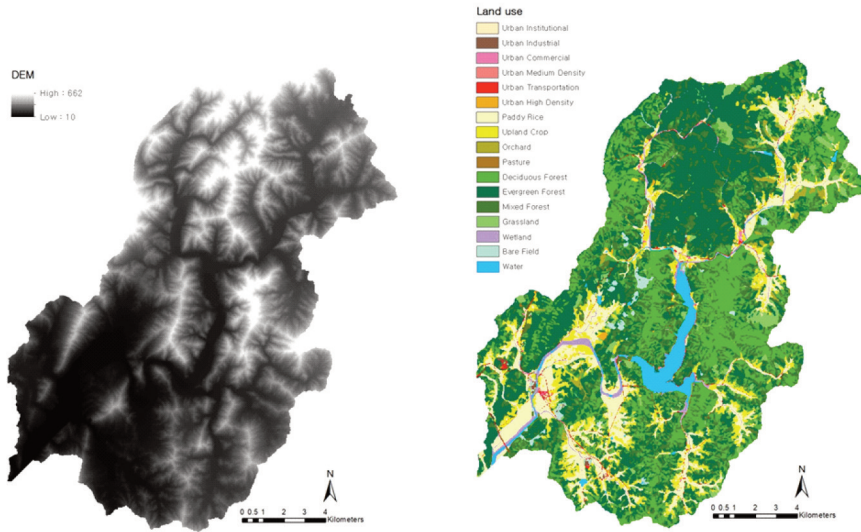


Figure 3. DEM and Landuse of the study area.

Table 1. Input Data for SWAT Modeling

Data Type	Description / Properties	Resolution	Source
Digital Elevation Model (DEM)	Contour map indicating topography (2010)	30x30m	United States Geographical Survey
Land use map	Landsat Thematic Mapper image (2014)	30x30m	Environmental Geographic Information Service
Meteorological data	Maximum and Minimum temperature (°C)	Daily mean	Korea Meteorological Administration
	Precipitation (mm)		
	Wind speed (m/s)		
	Relative humidity (%)		
	Solar radiation (MJ/m <sup>2</sup> /d)		
Soil map	Soil classifications and physical properties	1/25,000	Rural Development Administration

는 보령댐 수문자료 중 유입량을 사용하였다. 보령댐 유역면적은 163.3km<sup>2</sup>이며 연간용수공급용량은 106.6(106m<sup>3</sup>)이다.

#### 4. 그린워터 및 블루워터 산출

본 연구에서는 SWAT 분석 결과 도출된 각 요소에 그린워터와 블루워터 개념을 적용하여 수자원 안정성을 평가하였다. 블루워터는 지하에 저장되거나 하천에 흐르는 물이며 이를 산출하기 위하여 유출량(Water Yield-WYLD)과 지하수(Groundwater storage-(GW<sub>RCHG</sub>-GW<sub>Q</sub>))의 합을 이용하였다. 그린워터는 토양에 흡수되어 증발되거나 식물의 증발산에 의하여

소실되는 물로, 증발산량(Evapotranspiration-ET)을 수요량으로, 토양수(Soil Storage-SW)는 공급량으로 이용하여 산출하였다. 공급량과 수요량을 비교하여 물 부족 정도를 평가하였으며 그 결과 대상 유역의 물부족 발생 가능성이 가장 높은 시기를 도출하였다. 본 연구에서는 대상유역 내의 x지점의 시간 t에 대한 평가를 함으로써 공간적 특징과 계절적 특징을 반영하였다.

##### 1) 그린워터 산출

x유역의 시간 t에 대한 그린워터 부족량(GW<sub>scarcity</sub>)을 Eq. (3)과 같이 공급량(GW<sub>availability</sub>)과 수요량

( $GW_{\text{footprint}}$ )의 비율로 산출하였다(Hoekstra et al. 2011).  $GW_{\text{footprint}}$ 는 실제 증발산량으로 SWAT 분석을 통하여 도출된  $ET$ 에 해당된다.  $GW_{\text{availability}}$ 는 초기 토양수량으로 SWAT 분석 결과 중  $SW$ 를 이용하여 산출하였으며 토양수량은 식물생장이 가능한 토양의 수분함량을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 식물에 직접적으로 이용되는 물을 고려하기 위하여 SWAT 모의 결과 도출된 토양수량을 그린워터 공급량으로 보았다.

$$GW_{\text{scarcity}(x,t)} = GW_{\text{footprint}(x,t)} / GW_{\text{availability}(x,t)} \quad \text{Eq.(3)}$$

## 2) 블루워터 산출

블루워터의 공급량과 수요량(Footprint)를 이용하여 월별 부족량을 산출하였다. 블루워터는 지상 및 지하에 흐르는 물이며 본 연구에서는 유출량( $WYLD$ )과 지하수저장량의 합( $GW_{\text{RCHG}} - GW_Q$ )으로 도출하였다. 본 연구에서는 블루워터 공급량을 하천의 생태계에 영향을 미치지 않는 선에서 이용할 수 있는 유출량으로 보았으며 산출 과정에서 하천의 생태계 보존을 위한 하천 유지량(Environmental Flow Requirements; EFR)을 고려하였다. EFR의 고려는 생태계를 고려한 수자원 관리에 중요하며 따라서 본 연구에서는 유출량 전체가 아닌 유출량에서 EFR을 제외한 양만을 공급량으로 산정하였다(Acreman & Dunbar 2003). 공급량은 Eq. (4)를 이용하여 산출하였으며  $Q$ 는 해당 지역의 해당 시기의 유출량( $m^3/s$ )을 나타낸다.

$$BW_{\text{availability}(x,t)} = Q_{(x,t)} - EFR_{(x,t)} \quad \text{Eq. (4)}$$

하천 유지량은 하천의 물리적 특징 및 주변 생태계의 영향을 받으므로 이를 정확하게 도출하는 데 어려움이 있다(Veettil and Mishra 2016). 이에 본 연구에서는 가정적 표준 도출 방법(Presumptive Standard Method)을 이용하였으며(Eq. (5)) 이는 평균 유출량의 20%에 해당한다(Richter et al. 2012; Hoekstra et al. 2011; Zeng et al. 2012).

$$EFR_{(x,t)} = 0.2Q_{\text{mean}(x,t)} \quad \text{Eq. (5)}$$

블루워터 수요량은 생활, 공업, 농업용수를 포함

하며 생활용수는 상수도 급수지역 수요량, 상수도 미급수지역 수요량 및 기타 지하수 이용량의 합으로 추정한다. 공업용수는 기존 공단 및 개별입지업체 수요량과 계획 공단 및 개별입지 업체 수요량의 합으로 산출하며 농업용수는 논용수, 밭용수, 축산용수 수요량의 합으로 이루어진다(수자원장기종합계획 2011). 본 연구에서는 수자원장기종합계획의 2016년 유역별 용수 수요량을 이용하였으며 금강유역 면적과 대상유역 면적의 비율을 이용하여 블루워터 수요량을 도출하였다.

블루워터 부족량은 공급량( $BW_{\text{availability}}$ )과 수요량( $BW_{\text{footprint}}$ )의 비율로 산출하였으며 이에 대한 과정은 Eq. (6)과 같다.

$$BW_{\text{scarcity}(x,t)} = BW_{\text{footprint}(x,t)} / BW_{\text{availability}(x,t)} \quad \text{Eq. (6)}$$

## III. 결과

### 1. SWAT 모형 보정 및 검증

본 연구에서는 모형 보정에 주로 이용되는 매개변수인  $CN2$ ,  $SOL\_K$ ,  $SOL\_AWC$ 를 이용하여 보정을 실시하였다(Park et al. 2008; Won et al. 2015). 모형의 보정은 일별 유출량 자료(2014-2015)를 이용하여 시행착오법으로 실시하였으며, 모형의 검증은 보정된 매개변수를 적용한 후 모의 결과를 일별 유출량 자료(2016)와 비교함으로써 실시하였다.

SWAT 모형의 적용성 평가를 위하여 유효지수(Nash and Sutcliffe Efficiency, NSE)와 결정계수( $R^2$ )를 이용하였다. NSE는 SWAT 모형 적용성 평가를 위하여 검증과 보정시 대표적으로 사용되는 지수로써 그 값이 1에 가까울수록 모델이 실측 결과를 잘 나타낸다는 것을 의미하며 도출식은 아래와 같다(Nash & Sutcliffe 1970).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad \text{Eq. (7)}$$

( $O_i$  = 관측값,  $P_i$  = 모의값,  $\bar{O}_i$  = 실측값의 평균)

적용성 평가시 결정계수( $R^2$ ) 값이 0.5 이상이고 유효지수(NSE) 값이 0.4 이상일 경우 SWAT모형이 실제 현

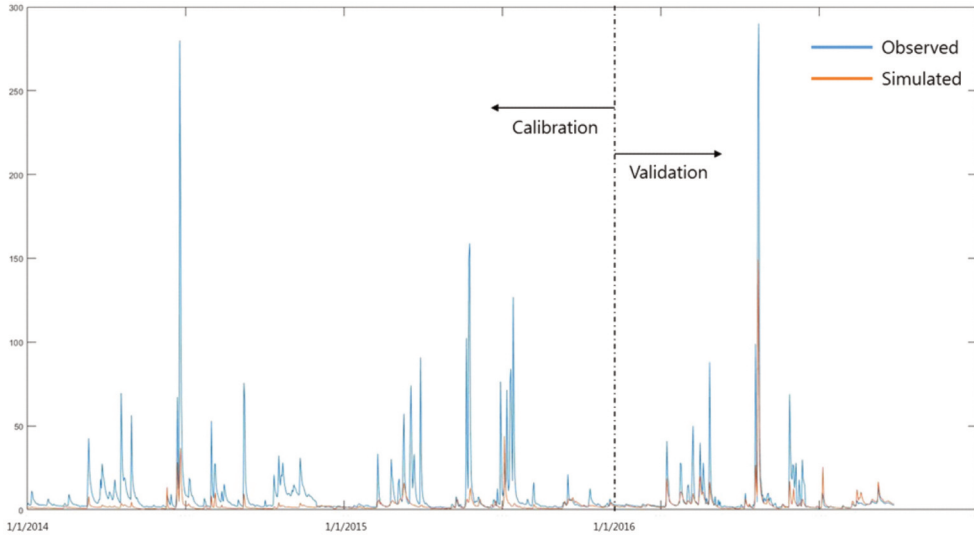


Figure 4. Time series plot of modeled (SWAT) and observed streamflow.

Table 2. Goodness of fit statistics of modeled and observed streamflow

Calibration Period	Validation Period	Calibration		Validation	
		NSE	R <sup>2</sup>	NSE	R <sup>2</sup>
2014-2015	2016	0.73	0.80	0.78	0.84

상을 적절히 예측한 것으로 평가한다(Ramanarayanan et al. 1997). 보정 결과 NSE와 R<sup>2</sup>이 각각 0.73, 0.80으로 도출되었으며 검증 결과 NSE와 R<sup>2</sup>이 각각 0.78, 0.84를 나타냈다(Table 2).

## 2. 물부족 평가 결과

대상유역의 지상유출수, 지하수저장량, 증발산량, 토양수량 및 강수량 대비 비율은 Table 3과 같으며 SWAT모형에서 산출된 토양수, 증발산량 및 유출량,

지하수량을 이용하여 그린 및 블루워터의 부족을 평가하였다.

### 1) 그린워터 평가 결과

SWAT을 이용하여 도출한 월별 증발산량(ET)과 토양수(SW)는 Table 4와 같다. 유역 면적을 이용하여 유역 전체의 증발산량과 토양수를 산출하였으며 Eq. (3)에 각각을 대입하여 그린워터를 평가하였다. 강수량은 7월에 130 mm 이상으로 가장 높게 나타났

Table 3. Annual Average of Green and Blue water flows, storage, and the fraction of rainfall

Precipitation (mm/yr)	Surface Water (mm/yr)	Groundwater storage (mm/yr)	Green water flow (mm/yr) (Actual Evapotranspiration)	Green water storage (mm/yr)
71.90	56.02(77.91%)	2.41(3.35%)	13.02(18.11%)	4.74(6.59%)

Table 4. Monthly Average of Green water (mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ET	3.3	5.5	10.2	15.4	19.6	17.5	30.7	20.3	13.5	12.1	5.4	2.86
SW	6.0	6.2	5.0	5.0	3.8	2.3	3.7	2.7	2.7	5.5	6.5	7.3

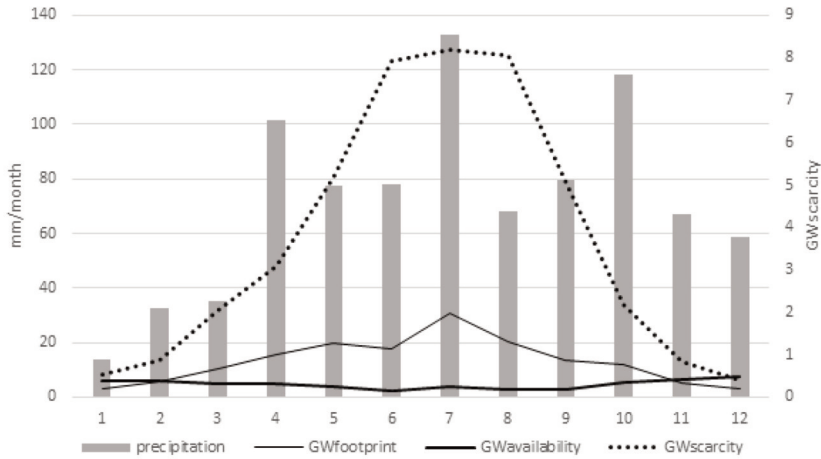


Figure 5. Green Water scarcity assessment.

Table 5. Monthly Green Water Scarcity (%)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Scarcity	0.6	0.9	2.0	3.1	5.2	8.0	8.2	8.0	5.1	2.2	0.8	0.4

으며 1월에 20 mm 이하로 가장 낮게 나타났다. 그린 워터 공급량의 경우 1년 동안 변화량이 적었으나 겨울보다는 여름에 공급량이 더 높게 나타났다. 이에 그린워터 공급량인 토양수의 경우 강수량 분포와 유사한 추세를 보이지 않는다는 것을 알 수 있다.

그린워터 수요량(Footprint)은 7월에 가장 높았으며 공급량과 반대로 1월과 12월에 가장 높게 나타났다. 또한 1월과 12월을 제외한 모든 기간에 그린워터 수요량인 증발산량이 공급량인 토양수보다 높게 나타났다. 그린워터 부족량 산출 결과 6, 7, 8월에 가장 높게 나타났으며 1, 12월에 가장 낮게 나타났다.

## 2) 블루워터 평가 결과

SWAT을 이용하여 도출한 지하수(GW\_RCHG, GW\_Q)와 유출량(YWLD)는 Table 6과 같으며 유출량에서 EFR을 제외한 양과 지하수저장량(GW\_RCHG

와 GW\_Q의 차)를 합하여 블루워터 공급량을 산출하였다. 블루워터 공급량은 그린워터 공급량과는 달리 강수량과 비슷한 추세를 보였다. 강수량이 많은 7월에 공급량이 가장 많았으며 강수량이 가장 적은 1, 2월에 공급량이 가장 적게 나타났다. 이는 블루워터를 구성하는 유출수 및 지하수가 강수량과 직접적인 상호관계를 갖기 때문이라고 할 수 있다.

블루워터 수요량(Footprint)은 수자원장기종합계획의 유역별 용수 수요량과 대상지의 면적 비율을 이용하여 도출하였으며 1, 2, 3월에 공급량에 비해 높게 나타났다. 이는 이 기간 동안 강수로부터 얻어지는 블루워터로 수요량을 충족할 수 없다는 것을 의미한다. 이에 1, 2, 3월에는 추가 용수 공급이 필요하며, 1, 2, 3월의 수요량을 충족할 수 있을 만큼의 용수 확보가 중요하다. 블루워터는 1월에 가장 높은 부족량을 보였으며 강수량이 가장 많은 7월 부족량이 가장 낮았다.

Table 6. Monthly Average of Blue water (mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
GW_RCHG	13.7	11.0	14.0	24.0	38.2	31.4	42.9	34.5	28.3	37.5	39.0	34.6
GW_Q	19.8	11.6	12.2	16.3	29.7	30.9	35.6	35.8	27.0	30.2	35.4	35.2
YWLD	27.3	23.1	24.9	48.3	64.6	60.4	85.2	62.4	60.0	78.3	71.9	65.8

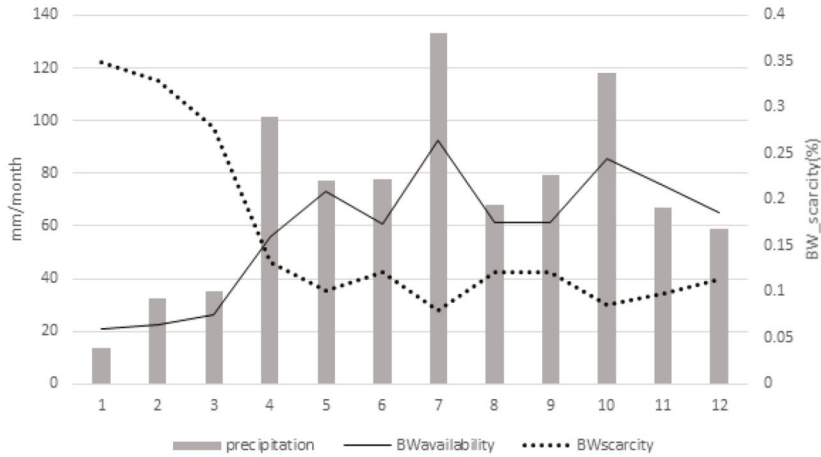


Figure 6. Blue Water scarcity assessment.

Table 7. Monthly Blue Water Scarcity (%)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Scarcity	0.35	0.33	0.28	0.13	0.10	0.12	0.08	0.12	0.12	0.09	0.10	0.11

## IV. 고찰

### 1. 그린워터 부족량 평가

그린워터는 식물이 직접적으로 사용할 수 있는 강수로써 수목 및 작물 생장에 직접적으로 영향을 미친다. 대상지역의 경우 1월과 12월을 제외한 모든 기간에 그린워터의 수요량이 공급량보다 높게 도출되었으며 특히 6월-8월에 그린워터 부족량이 가장 높게 나타났다. 이는 기존의 그린워터 평가 연구(Veettil and Mishra 2016)의 평가 결과와 비슷한 양상을 보이며 산림과 농지의 면적이 넓은 대상지의 특성에 기인한다.

그린워터 평가 결과 본 대상지는 1월과 12월을 제외한 기간에 수요량이 공급량보다 높으므로 강수에 의지한 농업이 부적절한 지역이며 식물 생장에 있어 추가적인 용수의 공급이 필요하다. 특히 농업용수의 경우 6-8월에 수요량이 가장 많은데, 이 시기에 그린워터 부족량이 높게 나타났으므로 이에 대한 대처가 필요함을 알 수 있다.

### 2. 블루워터 부족량 평가

블루워터 공급량의 경우 강수량이 높은 7월달에

가장 높게 나타났으며 강수량이 제일 적은 1월에 가장 낮게 나타났으며 이는 지하수 및 유출량인 블루워터의 특성에 기인한다. 수요량은 1년 평균을 사용하여 일정한 값을 가지며 앞으로의 연구에서 더욱 정확한 수요량을 이용함으로써 블루워터 부족을 더욱 정확하게 도출할 수 있을 것으로 기대된다. 수요량과 공급량을 비교한 결과 부족 비율이 1 보다 낮게 나타났으며 이에 공급량이 수요량을 충족시킴을 알 수 있다.

### 3. 물부족 평가

본 연구에서는 그린워터와 블루워터의 부족량을 각각 도출함으로써 물부족을 평가하였다. 그린워터와 블루워터 부족이 높게 나타나는 시기는 각각 여름과 겨울철로 매우 다른 양상을 보였으며 이러한 결과는 그린워터와 블루워터의 다른 특성에 기인한다. 토양수인 그린워터에 비해 지하수 및 하천 유출수인 블루워터의 수요량 및 공급량의 규모가 크게 나타나 이 둘을 통합하여 평가하지 못하였다는 한계가 존재한다. 하지만 블루워터만을 고려하는 기존의 평가 방법들과는 달리 그린워터를 고려함으로써 식물생장에 필요한 물의 부족을 평가하였다는 의의가 있다. 또한

농지 및 산림이 차지하는 면적이 넓은 대상지의 그린 워터가 부족한 시기를 도출함으로써 식물 생장에 필요한 물의 추가적 공급이 필요한 시기를 예측하여 수자원을 안정적으로 공급하는 데 기여할 수 있다.

## V. 결론

본 연구에서는 금강수계에 위치한 소유역을 대상으로 그린워터와 블루워터를 고려한 물부족 평가를 하였다. 기존의 수자원안정성 연구와는 달리 그린워터 및 블루워터 개념을 도입함으로써 식물생장 및 유지에 직접적으로 이용되는 토양수를 고려할 수 있으며 더욱 상세한 수자원 평가가 가능하다는 장점을 갖는다. 또한 월별 물부족 평가를 통하여 물부족이 발생할 확률이 가장 높은 시기를 도출하였으며 그린워터와 블루워터 각각의 특징에 대하여 분석하였다.

연구결과에 따르면 그린워터의 경우 강수량이 비교적 많은 7~8월에 부족량이 높게 도출되었으며 강수량이 적은 11~2월은 낮은 부족량을 나타냈다. 또한 그린워터 공급량에 강수량이 직접적인 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며 그린워터 수요량, 즉 증발산량의 경우 기온이 높은 여름철에 가장 높게 나타났고, 겨울철에 가장 낮게 나타났다. 그 결과 그린워터 부족량의 경우 강수량보다는 기온의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다.

블루워터는 그린워터와는 달리 강수량과 비슷한 추세를 보여 강수량이 많은 7~8월에 낮게 나타났으며 강수량이 적은 1~2월에 매우 높게 나타났다. 이는 블루워터 공급량이 강수량에 직접적인 영향을 받기 때문이다. 블루워터 수요량의 경우 생활용수, 공업용수, 농업용수를 포함하며 농업용수를 제외한 생활용수와 공업용수는 계절적 변화가 적으므로 블루워터 부족량은 수요량보다 공급량의 영향을 크게 받으며, 이에 강수량이 적은 시기에는 그만큼 부족량이 높게 나타나는 양상을 보였다.

향후 연구에서 기후변화의 영향을 고려한 미래에 대한 평가를 통하여 수자원 관리에 더욱 기여할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 블루워터 수요량 산출 과정에서 정확도를 높이고 월별 수요량을 이용함으

로써 더욱 정밀한 평가가 가능할 것이다. 농업지역의 경우 관개용수를 공급받는 저수지 등을 고려함으로써 현실을 더욱 잘 반영한 물부족 평가가 가능할 것으로 기대된다.

## 사사

본 연구는 환경부의 재원으로 “기후변화대응 환경 기술개발사업(과제번호:2014001310007)”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Acreman M, Dunbar MJ. 2004. Defining environmental river flow requirements – a review. *Hydrology and Earth System Sciences*. 8(5): 861-876.
- Ahn SR, Park GA, Kim SJ. 2013. Assessment of Agricultural Water Supply Capacity Using MODSIM-DSS Coupled with SWAT. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*. 33(2): 507-519. [Korean Literature]
- Alcamo J, Henrich T, Rosch T. 2000. World Water in 2025 - Global modeling and scenario analysis for the World Commission on Water for the 21st Century. *Kassel World Water Series*. 2: 3-47.
- Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part 1: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*. 34(1): 73-89.
- Calder IR. 2007. Forests and water-Ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management*. 251(1-2): 110-120.
- Falkenmark M, Lundqvist J, Widstrand C. 1989. Macro-scale water scarcity requires micro-

- scale approaches. *Natural Resources Forum*. 13: 258-267.
- Falkenmark M. 1997. Society's interaction with the water cycle: a conceptual framework for a more holistic approach. *Hydrological Sciences*. 42: 451-466.
- Falkenmark M, Rockstrom J. 2006. The new blue and green water paradigm: breaking new ground for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 132(3): 129-132.
- Falkenmark M, Rockstrom J. 2010. Building water resilience in the face of global change: from a blue-only to a green-blue water approach to land-water management. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 136(6):606-610.
- Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen MM. 2011. *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Earthscan.
- Hwang TH, Kim BS, Kim HS, Seoh BH. 2006. The Estimation of Soil Moisture Index by SWAT Model and Drought Monitoring. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*. 26(4B): 345-354. [Korean Literature]
- Jung CM, Shin MJ, Kim YO. 2015. A Comparison Study of Runoff Projections for Yongdam Dam Watershed Using SWAT. *Journal of Korea Water Resource Association*. 48(6): 439-449. [Korean Literature]
- Kim CR, Kim YO, Seo SB, Choi SW. 2013. Water Balance Projection Using Climate Change Scenarios in the Korean Peninsula. *Journal of Korea Water Resource Association*. 46(8): 807-819. [Korean Literature]
- Kim KS, Jung JS. 2001. Evaluation of Water Supply Capacity for Boseong River Basin by Water Budget Analysis. *Journal of Korean Society of Environmental Technology*. 2(1): 107-113. [Korean Literature]
- Lee DW, Jung J, Hong SJ, Han D, Joo HJ, Kim HS. 2017. Evaluation of Future Water Deficit for Anseong River Basin under Climate Change. *Journal of Wetlands Research*. 19(3): 345-352. [Korean Literature]
- Liu J, Yang H, Gosling SN, Kumm M, Florke M, Pfister S, Hanasaki N, Wada Y, Zang X, Zheng C, Alcamo J, Oki T. 2017. Water scarcity assessment in the past, present, and future. *Earth's Futre*. 5(6): 545-559.
- Ministry of Construction and Transportation, Korea Water Resources Corporation. 2010. *Water Vision 2020*.
- Mishra AK, Singh VP. 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*. 391: 202-216.
- Nash JE, Sutcliffe JV. 1970. River flow forecasting through conceptual model: Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10(3): 282-290.
- Palmer TN, Raisanen J. 2002. Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate. *Nature*. 415(6871): 512-514.
- Park JY, Lee MS, Lee YJ, 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. [Korean Literature]
- Ramanarayanan TS, Williams JR, Dugas WA, Hauck LM, Mc Farland AMS. 1997. Using APEX to identify alternative practices for animal waste management. *ASAE*

- International Meeting, Minneapolis, MN, August 10-14.
- Richter BD, Davis MM, Apse C, Konrad C. 2012. A presumptive standard for environmental flow protection. *River Research and Applications*. 28: 1312-1321.
- Rodrigues DBB, Gupta HV, Mendiondo EM. 2014. A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security. American Geophysical Union Publication. 7187-7205.
- Rockstrom J, Falkenmark M, Karlberg L, Hoff H, Rost S, Gerten D. 2009. Future water availability for global food production: The potential of green water for increasing resilience to global change. *Water Resources Research*. 45(7).
- Schuol J, Abbaspour KC, Srinivasan R, Yang, H. 2008. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. *Journal of Hydrology*. 352: 30-49.
- Sullivan CA. 2002. Calculating a Water Poverty Index. *World Development*. 30(7): 1195-1210.
- Sullivan CA, Meigh JR, Giacomello AM. 2003. The water poverty index: Development and application at the community scale. *National Resources Forum*. 27: 189-199.
- Van Griensve A, Ndomba P, Yalew S, Kilonza F. 2012. Critical review of SWAT applications in the upper Nile basin countries. *Hydrology and Earth System Science*. 16(9): 3371-3381.
- Van Loon AF, Van Lanen HAJ. 2013. Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling 700 framework. *Water Resources*. 49: 1483-1502.
- Veettil AV, Mishra AK. 2016. Water security assessment using blue and green water footprint concepts. *Journal of Hydrology*: 542: 589-602.
- Won KJ, Sung JH, Chung ES. 2015. Parametric Assessment of Water Use Vulnerability of South Korea using SWAT model and TOPSIS. *Journal of Korea Water Resource Association*. 48(8): 647-657. [Korean Literature]
- Zeng Z, Liu J, Koenenman PH, Zarate E, Hoekstra AY. 2012. Assessing water footprint at river basin level: a case study for the Heihe River Basin in northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*. 16: 2771-2781.