韓國水資源學會論文集
第48卷 第8號·2015年 8月
pp. 647~657

J. Korea Water Resour. Assoc.
Vol. 48, No. 8:647-657, August 2015
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2015.48.8.647
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

SWAT 모형과 TOPSIS 기법을 이용한 우리나라 물이용 취약성 평가

Parameteric Assessment of Water Use Vulnerability of South Korea using SWAT model and TOPSIS

원 광 재* / 성 장 현** / 정 은 성***
Won, Kwyang Jai / Sung, Jang Hyun / Chung, Eun-Sung

Abstract

This study assessed the water use vulnerability for 12 basins of South Korea. The annual runoff of 12 basins are derived using a Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and the calculated runoff per unit area and population are compared with each basin. The 18 indicators are selected in order to assess the vulnerability. Those are classified by aspects of demand, loss and supply of water use. Their weighting values used Entropy method to determine objective weights. To quantitatively assess the water use vulnerability, the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) based on multi-criteria decision making are applied. The results show that the water availability vulnerability of Hyeongsan River has the highest value followed by Sapgyo River; Dongjin River; Seomjin River; Anseong River; Mangyung River; Nakdong River; Tamjin River; Youngsan River, Geum River; Taehwa River; and Han River. The result of this study has a capability to provide references for the index deveopment of climate change vulnerability assessment.

Keywords : Water use vulnerability, SWAT, TOPSIS, Entropy

요 지

본 연구는 국내 12개 수계인 한강, 안성천, 금강, 삽교천, 영산강, 섬진강, 탐진강, 만경강, 동진강, 낙동강, 태화강, 형산강 유역에 대한 물이용 취약성 평가를 실시하였다. SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하여 국내 12개 수계의 연유출량을 도출하였고, 각 유역별 면적 및 인구당 유출량을 비교하였다. 취약성 평가를 위해 18개 지표로 구성하였고, 물이용의 수요, 손실 및 공급의 측면으로 구분하였다. 이때의 가중치는 객관적 가중치의 적용을 위해 엔트로피(Entropy) 방법을 사용하였고 정량적인 물이용 취약성 평가를 위해 다기준 의사결정기법 중 하나인 TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) 기법을 적용하였다. 그 결과, 형산강의 물이용이 가장 취약하였고, 삽교천, 동진강, 섬진강, 안성천, 만경강, 낙동강, 탐진강, 영산강, 금강, 태화강, 한강 순이었다. 본 연구 결과는 향후 기후변화 취약성 평가를 위한 지표 개발에 이용할 수 있겠다.

핵심용어 : 물이용 취약성, SWAT, TOPSIS, Entropy

* 서울과학기술대학교 건설기술연구소 연구원 (e-mail: kjwon@seoultech.ac.kr)
Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology
** 국토교통부 금강홍수통제소 예보통제과 시설연구사 (e-mail: jhsung1@korea.kr)
Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Geum River Flood Control Office
**** 교신저자, 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 조교수 (e-mail: eschung@seoultech.ac.kr, Tel: 82-2-970-9017)
Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

1. 서 론

최근 기후변화에 따른 지구 온난화 현상은 우리의 삶에 다양한 영향을 끼치고 있으며, 강수 또는 기온의 비정상성(non-staionarity)으로 대표되는 기후변화에 따른 수문순환의 변화 역시 어느 정도 가능성이 높은 시나리오로 받아들여지고 있다. IPCC 보고서는 기후변화로 전반적인 하천의 유량이 감소하리라 전망하고(IPCC, 2007) 있다. 생태계 기능 및 서비스를 유지하기에 충분하지 않은 하천유량은 복지실현을 어렵게 하고, 생태계 파괴로 이어질 수 있으므로(Falkemark, 2013), 미래 충분한 물 공급의 보장은 인간과 생태계의 공존을 위해 필수의 가치로 볼 수 있다(Oki and Kanne, 2006).

이러한 물 부족 현상을 규명하기 위하여 강우-유출모형이 오랜 기간 동안 사용되어져 왔고, 공간분석 기술의 발전은 강우-유출모형의 전·후처리에 많은 기여를 했다. 이러한 강우-유출모형의 효용성(efficiency)을 결정짓는 요소는 수문순환을 이루는 복잡하고 다양한 변수, 즉 매개변수들이다. 유출에 영향을 미치는 다양한 매개변수들의 추정을 위해서는 유역특성 인자들과 유역환경에 대한 정보가 우선되어야 한다. 이전에는 유역특성 인자들과 유역환경이 주로 도표나 수치형태로 관리되어 공간 특성을 한눈에 파악하기 어려웠기 때문에 지도정보와 수치정보 모두 관리되는 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)의 필요성이 대두되었다(Choi, 2014). 이러한 지리정보시스템의 발전을 바탕으로 최근에는 분포형(distributed) 및 준(semi)분포형 모형이 수자원 관리에서 복잡한 문제를 해결하기 위해 사용되고 있다(Beven, 1989; Beven, 2002; Sorooshian and Gupta, 1995). 그 중에서도 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형은 토양의 특징과 토지이용 그리고 다양한 시설물을 고려하여 유역의 유출 및 수질을 추정하는데 효과적이다.

물이용 취약성의 기본은 인간, 환경, 경제 등에 부정적인 영향을 미치지 않는 수준에서 수자원의 양과 질을 확보해야 한다는 것에서 시작된다. 즉, 가정생활 이외의 물 수요자에게 영향을 미치지 않는 범위 내에서 모든 가정에서의 일상생활을 위해 필요로 하는 수준의 양호한 수질과 풍부한 수량의 물을 확보하는 것으로 정의내릴 수 있다(Calow et al., 2002). 물이용 관련 취약성 평가를 위한 지표 연구로는 국외의 경우 수자원 이용에 관련된 사회, 경제, 환경 지표들을 통합하는 물부족 지수(Water Poverty Index, WPI)가 있다(Sullivan, 2001). 이는 해당 나라의 복지수준과 물이용 상황에 있어서의 관계를 파악하는데 목적이 있으며, 5개의 세부지수인 자원(Resources), 접근(Access), 이용능력(Capacity), 이용(Use), 환경(Environment)으로 이루어져 있고 그에 해당하는 지표로 구성되어있다. Vörösmarty et al. (2010)은 인간의 수자원 취약성 위협을 계산할 수 있는 공급의 안정화, 향상된 수자원 서비스 및 수로에 대한 접근을 의미하는 투자 이익 계수를 도출하였다. 국내의 사례로는 Baeck and Choi (2013)가 수문, 기상, 사회·경제 등의 다양한 요인들을 고려한 과거의 피해이력과의 분석을 통해 잠재지표를 선정하고 전문가들의 의견을 수렴함과 동시에 요인분석을 실시하여 국내 표준유역의 물이용 취약성 평가하였다. Kim (2014)의 연구에서는 지속가능한 물이용 목적을 달성하기 위해 지속가능한 수자원을 위협하는 압력 요인과 지속적인 수자원을 보장할 수 있는 반응 요인으로 구분하여 국내 중권역 물이용을 평가한 연구로 설문기반 가중치 및 가중합계법(Weighted Sum Method, WSM)을 사용하였다.

본 연구에서는 다기준 의사결정기법 중 하나인 TOPSIS 기법의 적용을 통한 국내 총 12개 수계 물이용 취약성 평가를 실시하였다. SWAT 모형을 이용한 1991~2014년의 각 유역별 모의 유출량 산정 및 비교와 이를 이용한 다양한 물이용 관련 18개 평가인자를 바탕으로 물이용 취약성을 도출하였다. 평가 인자는 물이용의 3가지 특징인 수요, 손실 및 공급을 바탕으로 사회·경제, 물이용, 수문모의 지표로 구분하였으며, 이 때 사용한 가중치는 자료의 속성정보만을 이용하여 산정하는 엔트로피 방법을 이용하였다.

2. 이론적 배경

2.1 연구 방법

본 연구의 절차는 Fig. 1과 같이 4단계로 구성되어 있는데, 1단계는 SWAT 모형의 구축이다. SWAT 모형 구축에 이용된 지형자료는 국가지리정보시스템(National Geographic Information System, NGIS)의 수치지형도로부터 격자 크기가 30×30 m인 DEM (Digital Elevation Model)과 환경부의 1:25,000 중분류 토지이용도 및 1:25,000의 정밀토양도이다. 기상자료는 기상청의 1991~2014년의 일강우(mm), 최고 및 최저기온(℃), 일사량(MJ/m^3 day), 평균풍속(m/s), 상대습도(%)이다. 구축된 수문모형의 최적 매개변수 선정은 SWAT-CUP의 5가지 알고리즘 중 가장 많이 사용되고 있는 SUFI-2 알고리즘을 사용하였으며, 목적함수로는 NSE (Nash and Sutcliffe Efficiency)(Nash and Sutcliffe, 1970)를 사용하였다. 2단계에서는 12개 수계의 1991년부터 2014년까지의 평균

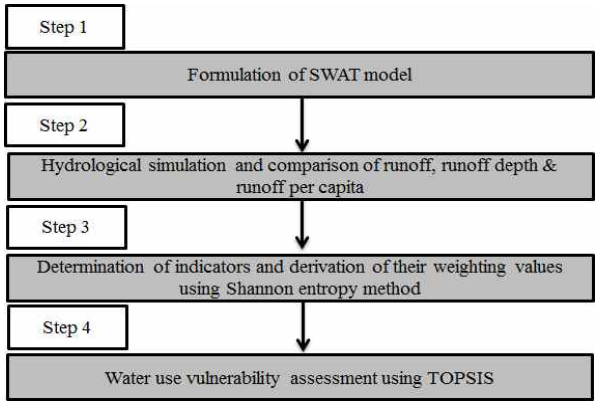


Fig. 1. Procedure in This Study

유출량을 바탕으로 유역별 유출량을 비교하였다. 3단계에서는 수자원 수요, 손실 및 공급에 따른 18개 지표 구성하였고 해당 지표의 가중치를 산정하였다. 가중치 산정에는 엔트로피 방법을 이용하여 객관적으로 도출하였다. 마지막으로 4단계에서는 TOPSIS 기법의 적용을 통한 국내 12개 수계의 물이용 취약성을 정량화하였다.

2.2 SWAT-CUP 모형 및 SUFI-2 알고리즘

SWAT 모형의 매개변수 최적화을 위한 SWAT-CUP은 SUFI-2, GLUE, ParaSol, PSO (Particle Swarm Optimization), MCMC (Markov Chain Monte Carlo)와 같은 총 5가지의 알고리즘을 제공하고 있다. 본 연구에서는 매개변수 최적화를 위한 5가지 기법 중 비교적 사용빈도가 많은 SUFI-2 기법을 이용하여 매개변수를 최적화하였다.

SUFI-2는 순차적으로 매개변수를 추정하는 방법으로 GLUE 알고리즘의 개념과 유사하다. SUFI-2 알고리즘은 다양하고 불확실한 매개변수로 이루어져 있으며, 모든 불확실성 정도는 95% 예측의 불확실성(95 Percent Prediction Uncertainty, 95PPU) 구간 내 비율인 *P-factor*로 나타낸다. 여기서 95PPU는 Latin hypercube sampling을 통해 얻은 출력변수의 누적 분포 2.5%와 97.5% 내의 누적분포를 통해 계산된다(Abbaspour et al., 2007). 또한 불확실성 정도를 평가 할 수 있는 다른 기준은 평균 95PPU를 관측치의 표준편차로 나누어 산정하는 *R-factor*가 있다. 이는 모든 과정과 기상자료와 같은 모형의 입력 자료가 모델 예측의 불확실성을 증가시킬 수 있다. 그러므로 불확실성에 의해 선택된 자료의 비율은 불확실성의 정도를 평가하는 좋은 기준이 될 수 있다.

2.3 엔트로피 방법

Shannon and Weaver (1949)에 의해 개발된 정보이론에서의 엔트로피(entropy)는 어떤 신호가 가지고 있는 정보용량으로 정의된다. 정보이론에 있어서 정보의 양과 더불어 중요한 것은 정보교환으로 보고있다. 신호가 보내짐으로써 정보교환이 이루어지고, 신호 자체가 가지고 있는 정보의 양이 많아서, 그 자체가 갖고 있는 불확실성을 감소시킬 정도로 많아지면 불확실성 감소 정도에 따른 간접적인 정보의 양을 측정할 수 있다. 즉, 엔트로피는 어떠한 체계 내에서 그 신호에 대한 정보를 수치로 나타내는 것이므로 엔트로피가 크다는 것은 그 지점에서의 불확실성의 감소 정도가 큼을 뜻하고, 같은 유역 내에서 받아지는 동일 신호에 대해 정보의 양이 많이 있다는 것을 의미한다(Lee et al., 2011).

엔트로피 방법은 가중치 추정에도 사용될 수 있는데 구체적으로 대안과 속성을 많이 포함하는 현실적인 다기준 의사결정 문제에 대해 의사결정권자가 비교적 이해하기 쉬운 정보이론 방법을 적용하는 것으로써, 선택된 평가항목의 속성 정보만 이용하여 가중치를 산정하는 방법이다. 자료의 속성을 이용하여 가중치를 설정하는 방법이기 때문에 객관적인 방법이다. 엔트로피 가중치를 결정하는 방법은 4단계로 나누어지며 구체적으로 나타내면 다음과 같다(Choi et al., 2013).

Step 1. 평가할 항목에 대해 행렬형태 구성 R은 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 평가 항목에 대한 표준화 결과를 r_{ij}라 하면, r_{ij}는 Eq. (2)와 같다.

$$R = [r_{ij}] \tag{1}$$

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}} \tag{2}$$

여기서, r_{ij}는 표준화된 평가치를 의미하며, i는 평가 유역이고($i = 1,2,3,\cdots,m$), j는 물이용 취약성 평가를 위한 지표 속성($j = 1,2,3,\cdots,n$)이다.

Step 2. 표준화된 평가할 항목에 대하여 엔트로피를 산정하는데 Eq. (3)을 이용하여 계산된다.

$$H_i = -k\sum_{j=1}^{n} f_{ij}\log f_{ij} \tag{3}$$

여기서, $k = \frac{1}{\log n}$ 이며, $f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} r_{ij}}$ 로 계산된다.

Step 3. 다양성의 정도를 나타내는 a_i를 이용하여 다양성 정도($a_i = 1 - H_i$)의 표준화를 통해 평가할 항목 별 가중치(w_i)를 산정한다.

$$w_{ij} = \frac{1 - H_i}{\sum_{i=1}^{m}(1 - H_i)} \quad (4)$$

여기서, $0 \le w_i \le 1$, $\sum_{i=1}^{m} w_i = 1$이다.

2.4 TOPSIS

Hwang and Yoon (1981)이 개발한 TOPSIS 기법은 양의 이상적인 해(Positive Ideal Solution, PIS)에 가깝고, 부의 이상적인 해(Negative Ideal Solution, NIS)에 먼 대안을 선택하는 것이다. 즉, 유클리디언 거리를 통해 이상적인 해를 찾는 방법으로써, 기후변화에 따른 다양한 수자원 문제 해결에도 활용되고 있다(Kim and Chung, 2013; Chung et al., 2014; Won et al., 2014). TOPSIS 기법을 적용하는 과정은 다음과 같다.

Step 1. 표준화를 실시한다. 표준화된 행렬 R은 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = [r_{ij}] \quad \begin{matrix} (i = 1,2,3,\cdots,m) \\ (j = 1,2,3,\cdots,n) \end{matrix} \quad (5)$$

여기서, r_{ij}는 표준화된 행렬을 의미하며, i는 각 유역, j는 물이용 취약성 평가를 위한 지표 속성의 개수를 의미한다. 이 때 편익기준(측정치가 클수록 더 선호되는 기준)과 비용기준(측정치가 작을수록 더 선호되는 기준)에 따른 표준화를 달리 실시한다.

Step 2. 표준화된 데이터에 가중치를 곱해준다. 가중화된 표준화 값(v_{ij})은 다음 Eq. (6)과 같다.

$$v_{ij} = w_j r_{ij} \quad \begin{matrix} (i = 1,2,3,\cdots,m) \\ (j = 1,2,3,\cdots,m) \end{matrix} \quad (6)$$

여기서, w_j는 지표의 가중치로 Eq. (6)과 같이 표준화된 행렬에 가중치를 곱하여 정리한다.

Step 3. 가중화된 표준화 값(v_{ij})으로부터 양의 이상적인 해(A^*)와 부의 이상적인 해(A^-)는 Eqs. (7) and (8)과 같이 정의된다.

$$A^* = \{v_1^*, v_2^*, \cdots, v_n^*\} \quad (7)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \cdots, v_n^-\} \quad (8)$$

여기서, $v_j^* = \max_i v_{ij}$, $v_j^- = \min_i v_{ij}$ 이다.

Step 4. 각 대안에 대한 양의 이상적인 해의 거리(S_i^*)와 부의 이상적인 해의 거리(S_i^-)는 Eqs. (9) and (10)과 같이 정의된다.

$$S_i^* = \sqrt{\sum (v_j^* - v_{ij})^2} \quad (9)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum (v_j^* - v_{ij})^2} \quad (10)$$

Step 5. 각 대안별 양의 이상적인 해와 부의 이상적인 해의 거리를 통해 상대적 근접도 계수(C_i^*)를 계산한다.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-} \quad (11)$$

Step 6. 상대적 근접도 계수를 통해 각 대안별 순위를 뽑는다.

2.5 적용대상

본 연구의 대상유역은 우리나라의 12개 수계로 한강, 안성천, 금강, 삽교천, 영산강, 섬진강, 탐진강, 만경강, 동진강, 낙동강, 태화강, 형산강이다. 한강은 17개, 낙동강은 22개, 금강은 14개, 영산강은 8개, 섬진강은 9개, 안성천은 18개, 삽교천은 16개, 탐진강은 4개, 만경강은 13개, 동진강은 8개, 태화강은 6개, 형산강은 9개의 중권역으로 구성하였고, 각 유역별 정보는 Table 1과 같다. 본 연구에서는 중권역 별로 SWAT 모형을 이용하여 유출량을 모의하였다.

3. 연구결과

3.1 SWAT 모형의 매개변수 보정 및 검증

본 연구에서는 유출 관련 매개변수의 보정과 검증을 위해 SUFI-2 알고리즘을 이용하였고 유출관련 18개의 매개변수를 각 유역별로 최적화하였다(Table 2). SWAT-CUP 모형의 매개변수를 변환하는 방식은 기본값이 치환되는 방법, 기본값에 곱해지는 방법, 기본값에 더해지는 방법이 있다. 본 연구에서는 기본값에 곱해지는 방법과 기본값이 치환되는 방법을 사용하였는데 구체적으로 기본값에 곱해지는 방법을 의미하는 'r_code'에서는 CN2, SOL_K, SOL_AWC 매개변수가 사용되었고, 기본값이 치환되는 방법을 의미하는 'v_code'에서는 ALPHA_BF, GW_DELAY, GWQMN, GW_REVAP, REVAPMN, RCHRG_DP, ESCO, OV_N, SLSUBBSN, CH_N2, CH_K2, ALHPA_BNK, SMFMX, SMTMP, SFTMP 매개변수가 사용되었다. 매개변수 최적화를 위한 최대/최소값은 SWAT-CUP 내 Absolute_SWAT_Values에서 제공하는 기본 범위를 사용하였다.

Table 1. Basic Information of 12 Basins

Name of Basin		Symbol	Basin area (km^2)	Population (People)	Number of Sub-basins
Han River	Han River	A1	34,428.10	18,366,766	17
	Ansung River	A2	1,658.66	1,834,349	18
Geum River	Geum River	A3	9,914.02	3,060,877	14
	Sapgyo River	A4	1,668.39	638,312	16
Youngsan River	Youngsan River	A5	3,469.58	1,725,070	8
	Seomjin River	A6	4,914.32	319,614	9
	Tamjin River	A7	505.52	42,161	4
	Mangyung River	A8	1,405.60	1,105,822	13
	Dongjin River	A9	1,117.53	240,685	8
Nakdong River	Nakdong River	A10	23,690.32	6,417,380	22
	Taehwa River	A11	660.86	725,310	6
	Hyeongsan River	A12	1,139.99	382,497	9
Total			87,572.89	34,858,843	144

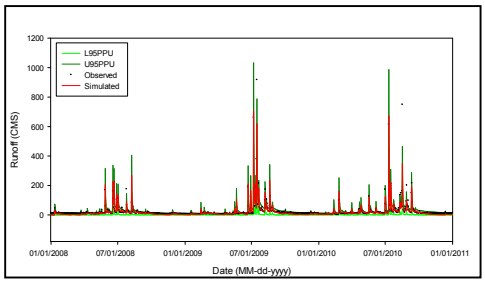
Table 2. The Boundary of Parameter Optimization for Runoff (Abbaspour et al., 2007)

Parameter	Definition	Parameter range	
		Min	Max
r_CN2.mgt	SCS runoff curve number f	0	98
r_SOL_K.sol	Saturated hydraulic conductivity	0	2000
r_SOL_AWC.sol	Available water capacity of the soil layer	0	1
v_ALPHA_BF.gw	Baseflow alpha factor (days)	0	1
v_GW_DELAY.gw	Groundwater delay (days)	0	500
v_GWQMN.gw	Treshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)	0	5000
v_GW_REVAP.gw	Groundwater "revap" coefficient	0.02	0.2
v_REVAPMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur (mm)	0	500
v_RCHRG_DP.gw	Deep aquifer percolation fraction	0	1
v_ESCO.hru	Soil evaporation compensation factor	0	1
v_OV_N.hru	Manning's "n" value for overland flow	0.01	30
v_SLSUBBSN.hru	Average slope length	10	150
v_CH_N2.rte	Manning's "n" value for the main channel	-0.01	0.3
v_CH_K2.rte	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	-0.01	500
v_ALHPA_BNK.rte	Baseflow alpha factor for bank storage	0	1
v_SMFMX.bsn	Maximum melt rate for snow during year (occurs on summer solstice)	0	20
v_SMTMP.bsn	Snow melt base temperature	-20	20
v_SFTMP.bsn	Snowfall temperature	-20	20

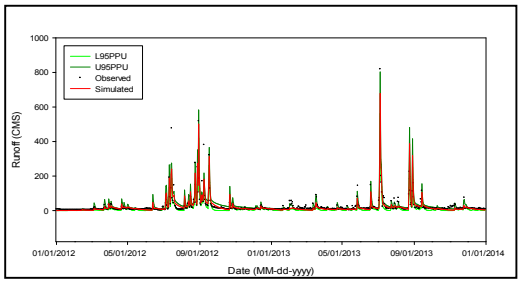
매개변수 최적화는 지류와 본류 댐의 개소수가 적어 자연유량을 산정하기에는 적합한 지역인 영산강 유역을 대상으로 실시하였다. 한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강 유역의 본류 관련 매개변수는 영산강 상류의 매개변수를 사용하였으며, 각 유역 지류는 황룡강, 지석천, 고막원천 유역의 매개변수 평균을 사용하였다. 안성천, 삽교천, 탐진강, 만경강, 동진강, 태화강, 형산강 유역의 경우 영산강과 섬진강의 특징을 고루 갖춘 중간 형태의 하천인 탐진강 매개변수를 사용하였다.

보정 및 검증된 모형을 이용하여 분석한 유량 시계열은 Fig. 2 및 Table 3과 같다. Moriasi et al. (2007)에 따르면 SWAT 모형의 매개변수 최적화의 목적함수로 사용된

< Calibration >

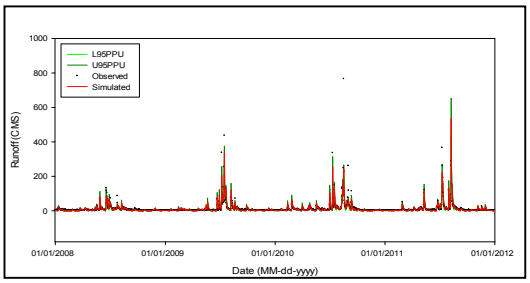


< Validation >

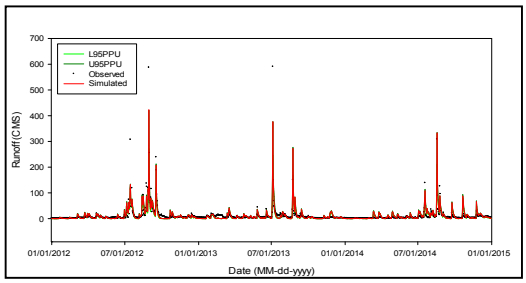


(a) The upper of Youngsan River

< Calibration >

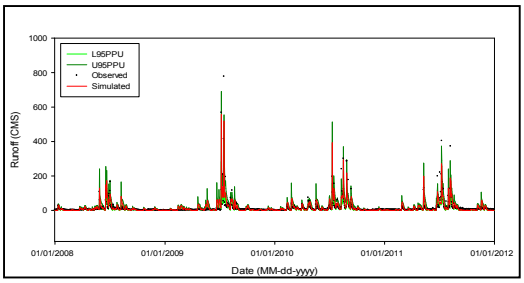


< Validation >

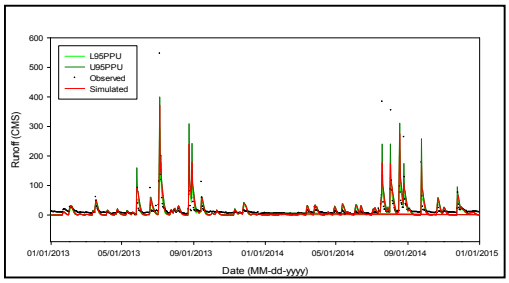


(b) Hwangreung River

< Calibration >

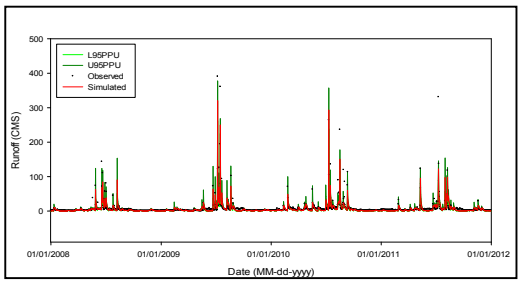


< Validation >

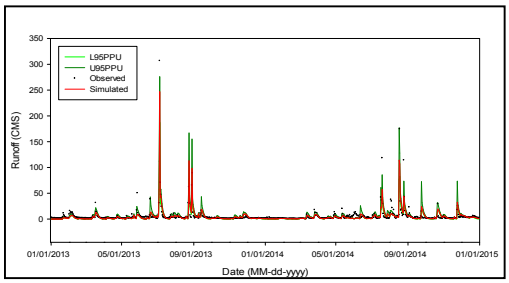


(c) Jisuk Stream

< Calibration >

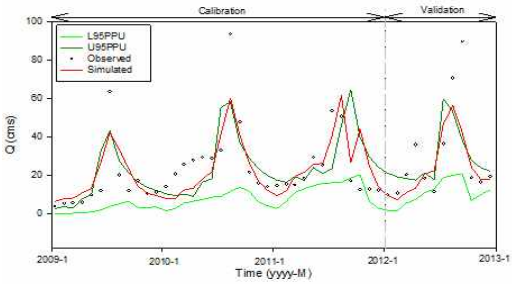


< Validation >



(d) Gomakwon Stream

< Calibration & Validation >



(e) Tamjin River

Fig. 2. Calibrated and Validated Hydrographs

NSE가 0.5 이상일 때 수문모형의 효용성이 비교적 만족됨을 제시한 바 있다. Table 3과 같이 모형의 보정 및 검증 결과로 본 연구의 목적함수로 사용된 NSE의 범위는 0.53에서 0.83으로 나타나 모든 유역에 대해 만족스러운 결과를 보였으며, R^2의 경우 0.77에서 0.91로 NSE와 마찬가지로 비교적 높은 수준이었다.

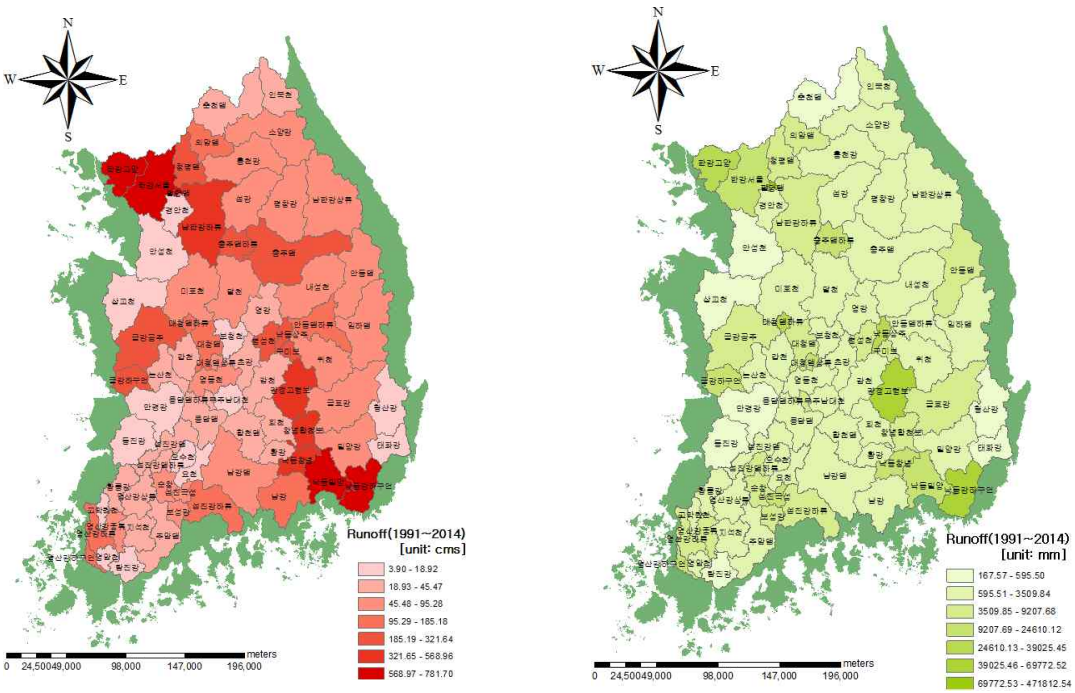
3.2 유출량 산정결과

최적화된 매개변수를 바탕으로 각 유역별로 1991년부터 2014년까지의 연평균 유출량을 비교한 결과는 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)와 같다. 연평균(1991~2014년) 유출량의 경우 한강 229.36 m^3/s, 낙동강 210.32 m^3/s, 금강 91.11 m^3/s, 섬진강 56.19 m^3/s, 영산강 47.18 m^3/s, 형산강 13.17 m^3/s, 만경강 11.90 m^3/s, 삽교천 9.78 m^3/s, 동진강 5.94 m^3/s, 탐진강 4.39 m^3/s, 태화강 3.90 m^3/s 순이었다. 유역면적의 크기에 따라 한강과 낙동강이 큰 유출량 크기를 보였고 동진강, 탐진강은 유출량이 적은 편이었다.

SWAT 모형의 유출량 결과를 단위면적당 유량으로 비

Table 3. SWAT Model Performances in Calibration and Validation

Watershed	Calibration		Validation	
	NSE	R^2	NSE	R^2
The upper of Youngsan River	2008/01/01 ~ 2010/12/31		2013/01/01 ~ 2014/12/31	
	0.83	0.91	0.81	0.90
Hwangnyong River	2008/01/01 ~ 2011/12/31		2012/01/01 ~ 2014/12/31	
	0.69	0.83	0.79	0.89
Jisuk Stream	2008/01/01 ~ 2011/12/31		2013/01/01 ~ 2014/12/31	
	0.73	0.86	0.57	0.77
Gomakwon Stream	2008/01/01 ~ 2011/12/31		2013/01/01 ~ 2014/12/31	
	0.73	0.86	0.73	0.85
Tamjin River	2009/01 ~ 2011/12		2012/01 ~ 2012/12	
	0.64	0.78	0.53	0.78



(a) Runoff (m^3/s) (b) Runoff depth (mm)

Fig. 3. Runoffs and Runoff Depths for all Sub-basins

교한 결과, 영산강은 428.80 mm, 형산강은 364.28 mm, 섬진강은 360.58 mm, 금강은 289.81 mm, 낙동강은 279.98 mm, 탐진강은 273.91 mm, 만경강은 266.95 mm, 안성천은 229.04 mm, 한강은 210.09 mm, 태화강은 185.90 mm, 삽교천은 184.86 mm, 동진강은 167.57 mm 순이었다. 영산강, 형산강이 가장 큰 수준의 단위면적당 유량을 보였으며, 삽교천, 동진강이 가장 작았다. 이는 유출량 크기와는 전혀 다른 결과로써 특히 한강의 경우 가장 많은 유출량에 비해 단위면적 유량에서는 4순위에 불과하였다.

유출량 크기에 따른 분포는 Figs. 4(a) and 4(b)와 같으며, 각 유역별 순위와 해당 유역 순위의 중앙값(median)의 절대편차를 바탕으로 산정된 변동성으로 유역 및 연도별 유량의 변화추이를 비교한 결과, 유출량의 경우 순위의 변동이 작았지만 단위면적당 유량은 비교적 심한 순위 변동을 보였다. 각 유역별 변동성을 비교해보면 안성천, 태화강 유역이 큰 변동성을 보였으며, 영산강, 섬진강 유역이 변동성이 작은 편이었다. 또한, 연 변동성을 보면 1995년에 큰 변동이, 1996년에는 작은 변동이 확인되었는데, 이는 당시의 연중 강수분포에 따른 결과이다. 즉, 1995년과 1996년 사이의 유량 차이가 가장 두드러졌으며, 2011년과 2012년에도 같은 현상이 확인되었다.

3.3 유출량 비교

본 연구에서는 SWAT 모형으로 계산된 연도별 유출량 크기에 따른 면적별 유출량인 비유량과 인구당 유출량을 계산하여 연평균 순위를 비교하였다(Fig. 5). 순위가 높을수록 유출량이 적어서 물 이용이 다른 유역에 비해 취약함을 의미한다.

유출량이 가장 많은 한강은 면적별 유출량에서는 4번째로 적어 순위 변동이 가장 큰 편이었다. 유출량이 두 번째로 큰 낙동강은 면적별 유출량에서는 4번째로 많았는데 유출량 크기가 가장 작은 태화강의 경우 면적별 유출량이 3번째로 적었고, 유출량이 2번째로 많은 탐진강은 6번째로 많은 양이 확인되었다. 영산강 유역의 경우 면적별 유출량에서 다른 유역에 비해 물이용이 취약하지 않은 편이었고, 그 다음으로는 형산강, 섬진강 순서였다. 동진강의 경우 영산강과는 다르게 다른 유역에 비해 물이용이 취약하였고, 그 다음은 삽교천, 태화강 순이었다.

인구당 유출량에서는 유출량이 가장 큰 한강이 면적별 유출량과 마찬가지로 4번째로 적었으며, 순위 변동성이 가장 컸다. 유출량이 두 번째로 많은 낙동강의 경우 인구당 유출량에서는 3번째로 큰 크기를 보였다. 유출량 크기가 가장 작은 태화강의 경우 인구당 유출량에서도 가장 적은 양으로, 다른 유역에 비해 물이용이 취약한 편이었다. 유출량이 2번째로 적은 탐진강은 2번째로 많은 양이었다. 섬진강 유역의 경우 인구당 유출량에서 다른 유역에 비해 물이용이 취약하지 않음을 보였고 그 다음으로는

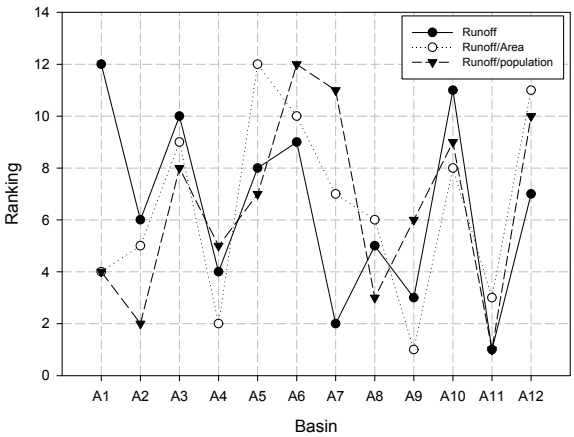
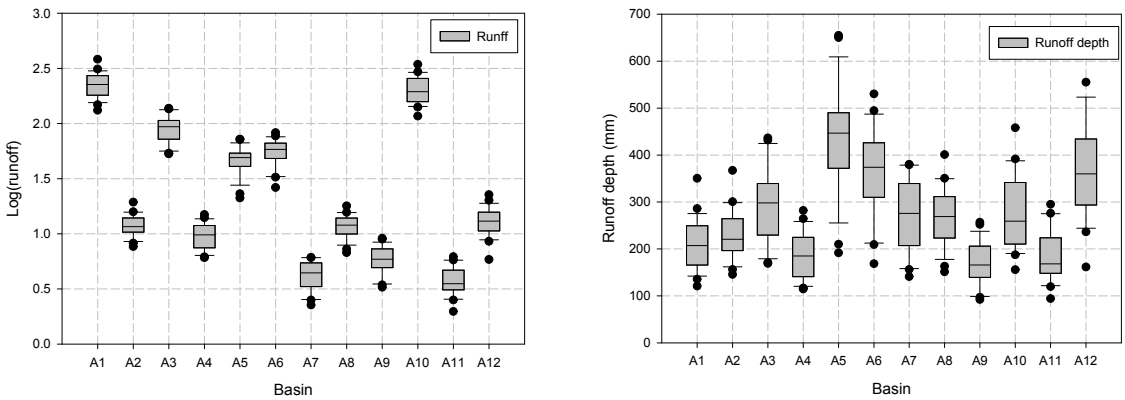


Fig. 5. Comparison between Runoffs



(a) Runoff (b) Runoff depth

Fig. 4. Box-Plots of Total Runoff and Runoff Depths (1991-2014)

탐진강, 형산강 순이었다. 위에도 언급했듯이 태화강은 섬진강과는 다르게 다른 유역에 비해 물이용이 취약하였고, 이어 안성천, 만경강 순이었다.

3.4 물이용 취약성 평가

SWAT 모의 결과를 바탕으로 수자원의 수요, 손실 및 공급에 따른 지표를 구성하여 국내 12개 수계에 대한 물이용 취약성 평가를 실시하였다. Table 4와 같이 평가 지수로는 사회/경제적 인자, 물 이용 인자, SWAT 모형의 결과인 수문인자로 구성하였으며, 각 지수별 지표(indicator)는 총 18개로 구성하였다. 수문 인자의 경우 SWAT 모의 결과를 바탕으로 계산하였으며, 나머지 지수의 지표는 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System, WAMIS)에서 제공하는 자료를 선별하여 구성하였다.

각 유역별 물이용 취약성의 정량적인 평가를 위해 TOPSIS 기법을 적용하였으며, 가중치의 경우 수계에 대한 평가치를 사용하여 객관적으로 산정하는 엔트로피 방법을 이용하였다. 각 유역별 물이용 취약성을 산정한 결과, Fig. 6과 같이 ① 형산강, ② 삽교천, ③ 동진강, ④ 섬진강, ⑤ 안성천, ⑥ 만경강, ⑦ 낙동강, ⑧ 탐진강, ⑨ 영산강, ⑩ 금강, ⑪ 태화강, ⑫ 한강 순으로 취약하였다. 유출이 가장 작은 수준이었던 태화강 유역은 한강 다음으로 덜 취약하였고, 국내 5대강 유역의 취약한 정도는 섬진강, 낙동강, 영산강, 금강, 한강 순이었다. 섬진강 유역은 5대

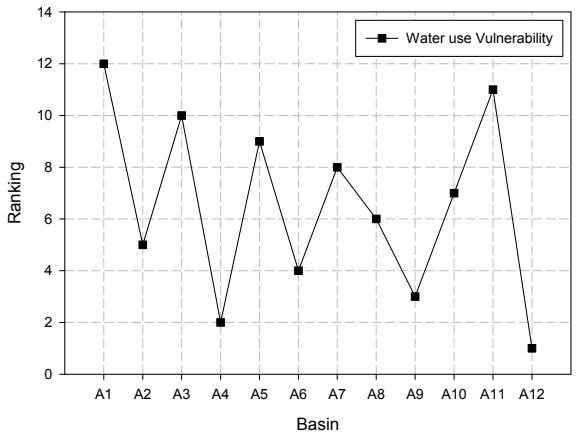


Fig. 6. Rankings for Water Use Vulnerability

Table 4. Indicators and Their Weighting Values for Water Use Vulnerability

Criteria	Sub-index	Weighting value	Description of Indicator	Weighting Value
Demand	Social/ Economic	0.460	Population density (people/km^2)	0.310
			Livestock production per watershed area (Number of livestock production/km^2)	0.393
			Groundwater development density (Number of groundwater development/km^2)	0.297
	Water availability	0.298	Dam density (Number of dam per watershed)	0.153
			Household water consumption per watershed area (10^3 m^3/s/km^2)	0.146
			Industrial water usage per watershed area (10^3 m^3/s/km^2)	0.316
			Agriculture water usage per watershed area (10^3 m^3/s/km^2)	0.067
			Water supply per population (m^3/day/people)	0.010
			Water supply distribution ratio (%)	0.003
			Stream-water usage per area (m^3/day/km^2)	0.251
			Groundwater availability (10^3 ton/km^2)	0.055
Loss	Hydrology	0.140	Evapotranspiration (mm)	0.764
			Percolation (mm)	0.236
Supply	Hydrology	0.102	Runoff per area (m^3/s/km^2)	0.046
			Runoff per population (m^3/s/people)	0.600
			Water yield (mm)	0.004
			Surface runoff (mm)	0.197
			Groundwater (mm)	0.152

강 중 가장 취약하였고, 12개 수계 중에서는 4번째로 취약하였다. 5대강을 제외한 유역은 형산강, 삽교천, 동진강, 안성천, 만경강, 탐진강, 태화강 순으로 취약하였고, 면적별 및 인구별 유출량 비교 시 물이용이 취약하지 않았던 형산강은 12개 수계 중 가장 취약하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 SWAT 모형과 TOPSIS 기법을 이용하여 국내 12개 수계의 물이용 취약성을 평가하였다. 첫 번째 SWAT 모형을 이용한 수문모형을 구축하였고, SWAT-CUP 프로그램의 SUFI-2 알고리즘을 활용하여 매개변수를 최적화하였다. 매개변수는 영산강 유역을 대상으로 추정하였으며 이를 이용하여 다른 수계에 확대 적용하여 유역별 유출량을 도출하였다. 모의된 유출량을 바탕으로 면적별 유출량과 인구당 유출량을 계산하여 비교하였다. 최종적으로 12개 수계의 유출량 모의결과와 물이용의 수요, 손실 및 공급과 관련된 18개 평가지표를 선정하였으며 다기준 의사결정기법 중 하나인 TOPSIS 기법을 이용하여 12개 수계에 대한 물이용 취약성을 평가하였다. 이때 평가지표에 대한 가중치는 유역별 평가기준에 대한 평가치를 고려하여 객관적으로 산정할 수 있는 엔트로피 방법을 이용하였다. 산정결과, ① 형산강, ② 삽교천, ③ 동진강, ④ 섬진강, ⑤ 안성천, ⑥ 만경강, ⑦ 낙동강, ⑧ 탐진강, ⑨ 영산강, ⑩ 금강, ⑪ 태화강, ⑫ 한강 순이었고, 이는 단순 유량 크기의 비교와는 다른 순위를 나타냈다. 이를 통해 도출된 결과는 향후 지역별 수자원 공급가능량 진단을 통한 수자원 관리와 기후변화에 따른 취약성 평가 지수 개발에 활용되리라 기대한다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

Abbaspour, K.C. (2007). “User Manual for SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs.” Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland.

Baeck, S.H., and Choi, S.J. (2013). “Evaluation of basin-specific water use through development of water use assessment index.” *Journal of Wetlands Research*, Vol. 15, No. 3, pp. 367-380.

Beven, K. (1989). “Changing ideas in hydrology-the case of physically-based models.” *J. Hydrol.*, Vol. 105, pp. 157-172.

Beven, K. (2002). “Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system.” *Hydrol. Process.*, Vol. 16, pp. 189-206.

Calow, R.C., MacDonald, A.M., Nicol, A.L., Robins, N.S., and Kebede, S. (2002). The struggle for water: drought, water security and rural livelihoods. Groundwater Systems and Water Quality Programme Commissioned Report CR/02/226N. British Geological Survey Technical Report. Wallingford, UK: BGS.

Choi, H.I., Park, S.Y., Song, J.H., and Park, M.J. (2013). “Identification of flood risk areas using a multi-criteria decision making method.” *Journal of KOSHAM*, Vol. 13, No. 2, pp. 237-243.

Choi, H.S. (2013). “Parameter estimation of SWAT model using SWAT-CUP in Seom-river experimental watershed.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 2, pp. 529-536.

Chung, E.-S., Won, K.J., Kim, Y.J., and Lee, H.S. (2014). “Water resources vulnerability characteristics by district's population size in a changing climate using subjective and objective weights.” *Sustainability*, Vol. 6, pp. 6141-6157.

Falkenmark, M. (2003). “Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges.” *Philos. T. Roy. Soc. Lond.*, Vol. 358, pp. 2037-2049.

Ghaffari, G., Keesstra, S., Ghodousi, J., and Ahmadi, H. (2010). “SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood basin, northwest Iran.” *Hydrol. Proc.*, Vol. 24, No. 7, pp. 892-903.

Hwang, C.L., and Yoon, K. (1981). “Multiple Attributes Decision Making Methods and Applications.” Springer: Heidelberg, Germany.

IPCC (2007). “Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.” In: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (eds)

Cambridge University Press, Cambridge.
Kim, Y.J. (2014). "Development and application of sustainable water use indicators." Korea Environment Institute Press, Seoul and Korea
Kim, Y.J., and Chung, E.-S. (2013). "Assessing climate change vulnerability with group multi-criteria decision making approaches." *Climate Change*, Vol. 121, pp. 301-315.
Lee, J.H., Jun, H.D., Park, M.J., and Jung, J.H. (2011). "Flash flodd risk assessment using PROMETHEE and Entropy method." *J. KOHAM*, Vol. 11, No. 3, pp. 151-156.
Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007). "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations." *Transactions of the ASABE*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.
Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models. Part I. a discussion of principles." *J. Hydrol.*, Vol. 10, pp. 282-290.
Oki, T., and Kanae, S. (2006). "Global hydrological cycles and world water resources." *Science*, Vol. 5790, pp. 1068-1072.
Shannon, C.E., and Weaver, W. (1949). "The Mathematical Theory of Communication." University of Illinois Press, London and New York
Sorooshian, S., and Gupta, V. (1995). "Chapter 2: Model calibration." Computer Models of Watershed Hydrology, Singh VP, Publications, LLC, Highlands Ranch, CO, pp. 23-68.
Sullivan, C.A. (2001). "The potential for caculating a maeaningful water poverty index." *Water International*, Vol. 26, No. 4, pp. 471-480.
Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P.A., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Reidy Liermann, C., and Davies, P.M. (2010). "Global threats to human water security and river biodiversity." Nature, 467, pp. 555-561.
WAMIS: http://www.wamis.go.kr
Won, K.J, Chung, E.-S, Kim, Y.J., and Hong, I.P. (2014). "Assessment of water resources vulnerability index by nation." *Journal of KWRA*, Vol. 47, No. 2, pp. 183-194.

paper number : 15-045
Received : 4 June 2015
Revised : 6 July 2015
Accepted : 6 July 2015