

금강유역의 토지이용 변화가 수문·수질 건전성에 미치는 영향 평가*

이지완¹ · 박종윤^{2*} · 정충길³ · 김성준⁴

Evaluation of Land Use Change Impact on Hydrology and Water Quality Health in Geum River Basin*

Ji-Wan LEE¹ · Jong-Yoon PARK^{2*} · Chung-Gil JUNG³ · Seong-Joon KIM⁴

요 약

본 연구는 금강유역을 대상으로 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)을 이용하여 유역 수문 및 수질에 대한 유역건전성 (Watershed Healthiness)을 평가하였다. 유역 수문과 수질에 대한 건전성은 다변수 정규분포를 이용하여 0(불량)에서 1(양호)의 범위로 산정하였다. 유역 건전성 평가에 앞서, SWAT 수문 검보정 결과 5개 지점에 대한 11년(2005~2015) 동안의 하천유출량의 Nash-Sutcliffe 모델효율(NSE)은 0.50~0.77이었고, 3개 지점에 대한 suspended solid(SS), total nitrogen(T-N), and total phosphorus(T-P)의 결정계수(R²)는 각각 0.67~0.94, 0.59~0.79, 0.61~0.79이었다. 총 24년(1985~2008)에 대한 토지이용변화에 따른 유역 건전성 분석을 위하여 1985년, 1990년, 1995년 2000년, 2008년 5개의 토지이용자료를 준비하였다. 기준년도인 1985년 대비 2008년 SWAT 총유출은 불투수면적의 증가로 40.6% 증가하였고, 토양 수분과 기저유출은 각각 6.8%, 3.0 % 감소하였으며, SS, T-N, T-P는 특히 농업활동으로 인해 각각 29.2%, 9.3%, 16.7% 증가하였다. 1985년 토지이용조건 대비 2008년의 유역 수문과 수질의 건전성은 각각 1에서 0.94와 0.69로 감소하였다. 본 연구의 결과는 과거 자연상태 대비 인간 활동에 의한 유역 환경변화를 감지할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : SWAT, 수문 수질 건전성, 다변량정규분포, 토지이용변화, 유역건전성지수

2019년 03월 27일 접수 Received on March 27, 2019 / 2019년 06월 03일 수정 Revised on June 03, 2019 / 2019년 06월 03일 심사완료 Accepted on June 03, 2019

* 본 논문은 한국환경정책·평가연구원서 일반사업으로 수행된 「환경평가 지원을 위한 지역 환경현황 분석 시스템 구축 및 운영(2018)」 과제의 결과로 작성되었습니다.

1 건국대학교 일반대학원 사회환경플랜트공학과 Graduate School of Civil, Environmental and Plant Engineering, Konkuk University

2 한국환경정책·평가연구원 환경평가본부 Environmental Assessment Group, Korea Environment Institute

3 Texas A&M AgriLife Research Center Agricultural and Water Resources Engineering, Texas A&M AgriLife Research Center at El Paso

4 건국대학교 공과대학 사회환경공학부 School of Civil and Environmental Engineering

※ Corresponding Author E-mail : jongyoonpark@kei.re.kr

ABSTRACT

This study evaluated the status of watershed health in Geum River Basin by SWAT (Soil and Water Assessment Tool) hydrology and water quality. The watershed healthiness from watershed hydrology and stream water quality was calculated using multivariate normal distribution from 0(poor) to 1(good). Before evaluation of watershed healthiness, the SWAT calibration for 11 years(2005~2015) of streamflow(Q) at 5 locations with 0.50~0.77 average Nash-Sutcliffe model efficiency and suspended solid (SS), total nitrogen(T-N), and total phosphorus(T-P) at 3 locations with 0.67~0.94, 0.59~0.79, and 0.61~0.79 determination coefficient(R^2) respectively. For 24 years (1985~2008) the spatiotemporal change of watershed healthiness was analyzed with calibrated SWAT and 5 land use data of 1985, 1990, 1995, 2000, and 2008. The 2008 SWAT results showed that the surface runoff increased by 40.6%, soil moisture and baseflow decreased by 6.8% and 3.0% respectively compared to 1985 reference year. The stream water quality of SS, T-N, and T-P increased by 29.2%, 9.3%, and 16.7% respectively by land development and agricultural activity. Based on the 1985 year land use condition, the 2008 watershed healthiness of hydrology and stream water quality decreased from 1 to 0.94 and 0.69 respectively. The results of this study be able to detect changes in watershed environment due to human activity compared to past natural conditions.

KEYWORDS : SWAT, Hydrology Water quality healthiness. Multi normal distributed, Landuse change, Watershed health index

서론

기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 4차 보고서(2007)에서는 미래 기후변화로 인한 영향중에서 가장 취약한 부분으로 기후시스템 변화에 따른 강수패턴의 시공간 변화로 인한 가용 수자원의 감소를 선정하였다. 이처럼 기후변화로 인한 강수패턴의 변화로 물순환 체계가 파괴되고 이로 인해 땅 속으로 스며드는 빗물량이 감소하여 지하수는 고갈되고 하천은 건천화가 된다. 이와 더불어 식생 및 토지이용의 변화와 같은 유역환경의 변화에 따라 유역의 수질 및 생태환경이 위협을 받고 있어 유역건전성 및 수자원취약성 평가기술 개발을 통해 기후변화 적응을 위한 대책마련이 절실한 실정이다.

유역은 지역사회가 기반을 두고 있는 현장이며, 유역의 생산품인 물은 일상생활에서 필수불

가결하기 때문에 쾌적하고 풍요로운 생활은 유역과 떨어져 생각할 수 없다. 우리나라는 급속한 경제성장을 이룩하기는 하였지만 유역의 수질, 수량 및 생태측면에서 문제점에 직면하게 되었으며, 점점 고갈되는 수자원을 확보하기 위해서 유역 수준에서 관리가 필요하다(ME, 2003).

최근 하천유역은 기후변화, 도시화에 따른 불투수 면적 및 취수량의 증가, 하천개수 등의 영향으로 기존의 정상적인 유역의 물 순환 체계가 파괴되어 지하수위는 낮아지고 하천 유량이 감소되어 하천이 정상적인 기능을 하지 못하고 있다. 또한 하천 건천화에 따른 유지유량의 부족은 하천을 중심으로 한 수질오염원의 증가 등의 문제를 초래하고 있다(Lee and Lee, 2006). 이러한 유역 환경의 변화, 수자원의 비효율적 활용 등에 의해 유역의 수리·수문학적 건전성은 심각하게 왜곡되고 있는 것이 현실이

며, 이에 따른 부작용으로 지표유출수의 증가, 하천 기저유량 감소, 홍수피해 증가 및 수질오염과 도시 사막화 등의 부작용이 심화되고 있다. 따라서 지속가능하고 건전화된 물순환을 위해서는 해당 유역의 물순환계를 정확히 파악하고 기후변화에 의한 예측 및 대응이 가능한 해석기술 개발이 요구되며, 특히 유역 물순환 건전성 효율을 객관적으로 정량화할 수 있는 평가기법의 수립이 선행되어야 한다(Choi *et al.*, 2009).

유역 건전성은 주로 큰 하천에서의 친수성, 서식처, 유량 및 수질 등에 적용되어 왔다(Seo, 2009). 아직까지 유역 건전성을 명확하게 정의 내린 연구는 없으며, 연구자에 따라서 분야별로 세분화 되어 다른 기준으로 다양하게 평가되고 있다. 유역의 물순환 측면에서의 유역 건전성을 “평상시 하천의 유량과 지하수위, 수질, 생태계 등 하천의 물 순환 체계가 정상적인 기능을 유지하는 것” (Lee *et al.*, 2006), “태양과 중력에 의한 자연의 물순환 시스템으로서 특정 유역에 오랜 시간에 걸쳐 반복되어 균형을 이룬 상태” (Choi *et al.*, 2009)라고 정의하고 있다.

유역환경 및 생태적 측면에서의 유역건전성 개념을 살펴보면, 미국 환경보호청(EPA, U.S. Environmental Protection Agency)에서는 건강한 유역 체계란 유역에서 건전성을 규명하고 보호하기 위해 상호연관성을 가지는 동적인 시스템으로 정의하고 있다. 즉 수문, 수질, 토지이용, 수생태, 생물학적 조건 등의 주요 특성에 대하여 동적으로 발생하는 상호작용의 평가를 통해 이해될 수 있는 통합시스템의 개념으로 이해할 수 있다. 또한 평가를 위해서는 토지 및 물 사용의 변화를 포함하여 기후변화와 인구증가에 따른 취약성과 같은 미래 변화에 대한 예측을 포함시켜야 한다고 제시하고 있다.

국내에서는 최근 들어 유역 건전성을 확보하기 위해 수량 및 수질관리, 환경문제 등의 해결을 위해 유역관리 차원에서 접근하려는 시도가 시작되었으나 어떠한 수단을 통해 유역관리를 접근할 수 있는지에 대한 연구는 아직 부족함

실정이다. Ahn and Kim(2017)은 유역의 수량(증발산, 하천유출량, 토양수분, 지하수, 댐 및 저수지 방류량 등), 뿐 아니라 유역환경(식생 및 토지이용 등)을 종합적으로 고려하여 유역의 건전성을 평가하는 것이라 정의하고, 한강유역의 유역건전성 평가 결과를 제시한 바 있다.

그러나 선행연구를 통해 제안된 기존 유역 건전성 평가지수 산정 방법은 현재 상태의 유역건전성 산정을 목적으로 개발된 것으로, 유역별 현재상태의 건전성을 상대비교 함으로써 유역 내에서 상대적으로 취약한 지역, 보호 및 복구를 우선으로 해야 하는 유역을 도출하기 위해 개발된 기법이다. 이러한 산정방법은 연대별, 혹은 평가기간별 분석 시 기준이 되는 기준값이 부재함에 따라 동일한 유역에 대한 절대비교가 불가능하다. 유역에서의 장기간 환경변화에 의한 건전성 변화를 도출하기 어렵다는 단점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 EPA(2012)와 Ahn and Kim(2017)이 제안한 유역건전성 평가지수 6개 중 수문, 수질 2개의 유역건전성 평가지수를 대상으로 다변수 정규분포를 통해 기준값(reference value)에 대한 확률밀도함수를 산정하여 장기간 환경변화에 의한 건전성 변화 분석이 가능하도록 기존 유역건전성 지수를 개선하였다.

자료 및 방법

1. 대상유역

본 연구의 대상유역은 금강유역으로 전라북도 장수군에서 발원하여 무주, 금산, 영동, 옥천, 보은, 청주, 대전, 세종, 공주, 청양, 논산, 부여, 서천, 익산을 지나 군산만에서 서해로 유입된다. 유역면적은 9,645.5km²이며, 유로연장은 384.8km이다. 금강유역 내에는 2개의 다목적댐인 용담댐(YDD), 대청댐(DCD)과 3개의 다기능 보인 세종보(SJW), 공주보(GJW), 백제보(BJW)가 설치되어 운영 중이다. 유역 전체 면적의 62%가 산림으로 이루어져 있으며, 논이

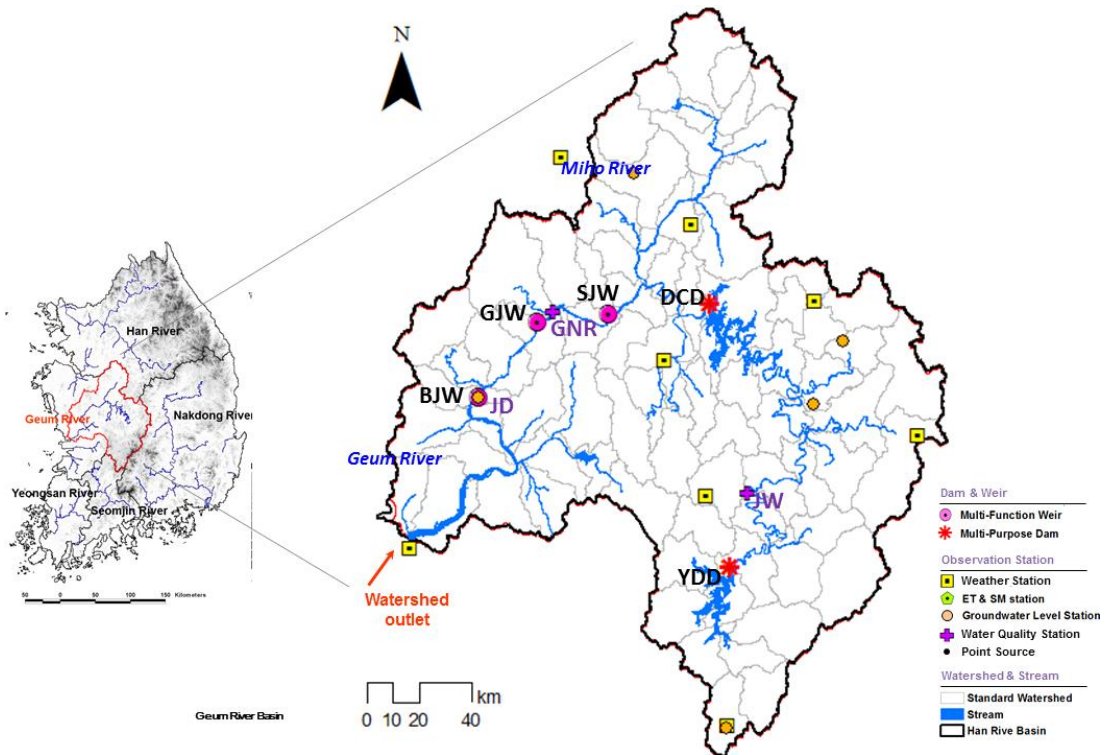


FIGURE 1. Study area

15%, 밭은 11%를 차지하며 나머지 도시와 초지, 나지 등은 3%~5%를 차지한다. 유역의 과거 연평균 강수량은 1,323.1mm, 연평균 기온은 12.2°C이다. 금강유역은 세종시 개발 등 하천 물환경변화와 도시화에 따른 불투수면 증가 등으로 물순환 구조가 악화된 지역이다. 그림 1은 금강유역 내 78개의 소유역과 댐, 보 위치 및 수질 검보정 지점인 제원(JW), 곰나루(GNR), 정동(JD)지점을 나타낸 것이다.

2. 유역건전성 평가방법

Ahn and Kim(2017)이 제안한 유역건전성 산정 식 중 수문(강수량, 총유출량, 지표유출, 침투, 토양수분, 중간유출, 침투, 지하수 충전량, 기저유출), 수질(SS, T-N, T-P) 요소에 대해 유역 건전성 지수를 도출하는 과정은 다음 식 (1)~(3)과 같다. 수문에 대한 9개의 요소와 수질에 대한 3개의 요소를 각각 식 1을 활용하고

Normalized component value로 정규화하고 이를 수문, 수질 2개의 sub-index로 도출한다 (식 2). 수문·수질에 대한 종합적인 건전성 평가는 2개의 sub-index와 식 3을 통해 1개의 지수로 산정하여 평가할 수 있다. 여기서, 정규화는 유역 내에서 percentile rank 방법에 의해 계산되며 지수의 범위는 0에서 1 사이로 1에 가까울수록 건강한 유역을 의미한다.

본 연구에서는 1985년 토지이용을 적용한 SWAT 모의결과를 이용하여 수문·수질 건전성을 평가하였고 이를 장기간 환경변화에 따른 건전성 변화분석을 위한 기준값으로 활용하였다.

$$\text{Normalized component value} = \frac{\text{Observed value for watershed}}{\text{reference value in watershed}} \quad (1)$$

$$\text{Sub-index} = \frac{(\text{normalized value } 1 + \dots + \text{normalized values } x)}{x} \quad (2)$$

$$\text{Watershed health index} = \frac{(\text{sub-index } 1 + \dots + \text{sub-index } x)}{x} \quad (3)$$

3. 다변량 정규 분포를 이용한 수문·수질 건전성 절대평가

다변량 정규분포는 일변량 정규분포를 둘 이상의 변수로 일반화한 것이다. 이는 상관관계가 있는 변수로 구성된 확률 벡터에 대한 분포이며, 벡터의 각 요소는 일변량 정규분포를 가진다. 가장 간단한 경우 변수 간에 상관관계가 없으며 벡터의 각 요소는 독립 일변량 정규 확률 변수이다. 식 (4)는 이변량 정규분포를 나타낸 것으로서, 다변량 정규분포는 평균 벡터 μ 와 공분산 행렬 Σ 로 모수가 지정된다. 이는 일변량 정규분포의 평균 μ 모수 및 분산 σ^2 모수와 비슷하고 Σ 의 대각선 요소는 각 변수에 대한 분산을 포함하는 반면, Σ 의 비대각선 요소는 변수 간 공분산을 포함한다. 다변량 정규분포는 다변량 데이터에 대한 모델로 대개 사용되는데, 이는 주로 다변량 정규분포가 다루기 쉬운 몇몇 다변량 분포 중 하나이기 때문이다 (Gokhale *et al.*, 1989).

이변량 정규분포를 X와 Y가 서로 다른 두 개의 이산확률변수라 할 경우 $P(X=x, Y=y)$ 로 나타나는 이변량 확률함수는 확률변수 X가 특정한 값 x를 갖고 확률변수 Y가 특정한 값 y를 갖는 결합확률을 보여준다.

$$f_{x_1x_2}(x_1, x_2) = \frac{1}{(2\pi)\sigma_{x_1}\sigma_{x_2}\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\left(\frac{x_1-\mu_{x_1}}{\sigma_{x_1}}\right)^2 - 2\rho\left(\frac{x_1-\mu_{x_1}}{\sigma_{x_1}}\right)\left(\frac{x_2-\mu_{x_2}}{\sigma_{x_2}}\right) + \left(\frac{x_2-\mu_{x_2}}{\sigma_{x_2}}\right)^2\right]\right\} \quad (4)$$

여기서, $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$ 는 이변량 정규분포를 따르는 변수, $u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$ 는 각 변수의 평균, σ_{x_1} 는 x_1 변수에 대한 분산, σ_{x_2} 는 x_2 변수에 대한 분산, $\rho = \frac{E[(x_1 - \mu_{x_1})(x_2 - \mu_{x_2})]}{\sigma_{x_1}\sigma_{x_2}}$ 이며 E 는 평균이다 (Kim, 2011).

본 연구에서는 상대평가만 가능했던 기존 유역건전성 평가지수를 개선하기 위해 다변량 정규분포 확률함수를 적용하여 기준값을 산출하였다. 1985년 토지이용을 적용한 SWAT 모의 결과에 대해 식 (1)~(3)을 통해 산정된 수문, 수질 건전성 평가결과를 가장 자연적인 조건에서의 기준값으로 정의하였다. 기준값으로부터의 유역건전성 지수를 도출하는데 필요한 SWAT 모의 결과를 변수로 설정하였다. 산정된 변수로부터 Python 프로그램을 이용하여 다변량 정규분포를 실시하여 확률밀도함수를 산정하였다.

4. 수문과 수질 건전성 평가를 위한 자료 구축

EPA(2012)에서는 개발 전 유역의 연평균 하천유량에 대한 댐 저수량의 비를 수문 축 유역건전성을 평가하는 요소로 사용하였으나, 우리나라의 유역 수자원 특성상 하천유출량, 증발산량, 토양수분, 지하수는 매우 중요한 수문요소이기 때문에, 본 연구에서는 수량 측면의 유역관리에 있어 유역의 수문순환 요소를 모두 고려하여 건전성을 평가하였다. 본 연구에서는 수문 유역건전성 평가를 위해 Lee *et al.*, (2018)의 SWAT 검·보정 결과를 활용하였으며, 이 중에서 손실되는 요소(증발산량, 잠재증발산량)를 제외하고 total(강수량, 총 유출량), surface processes(지표유출), soil water dynamics(침투, 토양수분, 중간유출), groundwater dynamics(침투, 지하수충전량, 기저유출) 총 4개의 평가요소로 나누어 분석하였다.

유역수질 측면의 유역건전성 평가는 SS, T-N, T-P의 농도기준에 따른 분포를 각각의 평가요소로 산정하여 표준유역별로 제시하였다.

SWAT 모의 결과 파일 중 Output.rch를 이용하여 수질 모의 결과를 정리할 수 있는데. Output.rch에서는 SS, T-N, T-P 모의 결과가 부하량(ton/day 또는 kg/day)으로 산정됨에 따라 하천유출량 모의 결과를 활용하여 농도(mg/L)로 환산하였다.

결과 및 고찰

1. SWAT 모형의 수문·수질 검보정 결과

SWAT 모형은 장기-강우유출모형으로 장기 간에 걸친 다양한 토양속성과 토지이용 및 관리상태의 변화에 따른 크고 복잡한 유역의 유출량 및 비점원오염을 추정하기 위해 미국 농무성 농업연구소(USDA, ARS)에 의해 개발된 유역모델이다(Lee *et al.*, 2008). 본 연구에서는 SWAT 모형을 이용하여 1985년부터 2005년의 토지이용 변화에 따른 수문·수질 모의에 앞서 모형의 검·보정을 실시하였다.

금강유역에 대한 SWAT 모형의 수문 검·보

정은 Lee *et al.*(2018)과 Shin *et al.*(2018)이 제안한 매개변수를 적용하였으며, 그림 1에서와 같이 YDD, DCD, SJW, GJW, BJW에 대한 검보정을 실시한 결과 댐 유입량에 대한 NSE는 0.50~0.77의 범위로 분석되었으며, RMSE는 0.94mm/day~1.67mm/day, PBIAS는 -3.35%~7.86%의 통계치를 보여 모든 검·보정 지점에 대해 결과가 통계적으로 유의한 수준인 것으로 분석되었다(Lee *et al.*, 2018).

수문 검보정 결과를 토대로 금강유역 내 3개의 지점(JW, GNR, JD)에 대한 수질 검보정을 실시하였다. 검보정을 위해 2005년부터 2015년 까지 물환경정보시스템 하천수 수질 측정자료를 수집하였다. SWAT 모형에서 영양물질은 유사량의 이동과 유출에 의해 영향을 받기 때문에 영양물질에 대한 보정을 하기 앞서 유사량에 대한 보정을 수행하였다(Park *et al.*, 2008).

검·보정에 앞서 금강유역에 대한 수질 매개변수 민감도를 수행하고 표 1과 같이 최적의

TABLE 1. The calibrated parameters for SWAT model

Parameters	Definition	Range	Adjusted Value				
			JW YDD	GNR DCD	SJW	GJW	JD BJW
SS							
CH_COV1	Channel erodibility factor	-0.05 to 0.6	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
USLE_P	USLE equation support practice factor	0 to 1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
T-N							
LAT_ORGN	Organic N in the baseflow (mg/l)	0 to 200	5	5	100	100	100
CH_ONCO	Organic nitrogen concentration in the channel (ppm)	0 to 100	5	5	100	100	100
SOL_NO3	Initial NO3 concentration in the soil layer (mg N/kg soil of ppm)	0 to 100	2	2	50	50	50
SOL_ORGN	Initial organic N concentration in the soil layer (mg N/kg soil of ppm)	0 to 100	1	1	50	50	50
T-P							
GWSOLP	Concentration of soluble phosphorus in groundwater contribution to streamflow from subbasin (mg P/L)	0 to 1000	0.028	0.018	0.1	0.1	0.1
CH_OPCO	Organic phosphorus concentration in the channel (ppm)	0 to 100	-	-	10	10	10
SOL_ORGP	Initial organic P concentration in soil layer (mg P/kg soil or ppm)	0 to 100	-	-	2	2	2

TABLE 2. Calibration and validation results for dam flow, storage and water quality

Model output	Evaluation criteria	YDD		DCD		SJW		GJW		BJW	
		Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.	Cal.	Val.
Dam inflow (mm)	R ²	0.67	0.70	0.75	0.71	0.75	0.64	0.80	0.61	0.81	0.62
	NSE	0.55	0.58	0.70	0.64	0.69	0.64	0.76	0.57	0.77	0.50
	RMSE (mm/day)	1.58	1.74	1.60	1.26	1.18	0.46	0.99	1.08	1.00	1.55
	PBIAS (%)	10.48	-0.58	9.77	6.27	7.48	-0.94	1.24	-12.53	-2.88	-0.41
Dam storage (106m ³)	R ²	0.68	0.78	0.65	0.68	0.55	0.70	0.55	0.72	0.57	0.31
	NSE	0.79	0.94	0.95	0.93	0.92	0.98	0.98	0.99	0.99	1.00
	RMSE (mm/day)	2.19	1.57	2.02	2.10	0.12	0.15	0.25	0.28	0.27	0.16
	PBIAS (%)	1.26	8.99	-16.99	-3.86	5.34	1.00	2.62	-0.93	-0.38	1.83
Model output	Evaluation criteria	JW(YDD)		GNR(DCD, SJW,GJW)		JD(BJW)					
		Calibration	Validation	Calibration	Validation	Calibration	Validation				
SS (ton)	R ²	0.94	0.67	0.86	0.73	0.74	0.70				
T-N (kg)	R ²	0.74	0.77	0.59	0.79	0.62	0.75				
T-P (kg)	R ²	0.79	0.77	0.77	0.69	0.61	0.66				

매개변수를 선정하였다. 토양침식 매개변수인 USLE_P와 하천침식계수인 CH_COV1 등을 조정하여 3개의 관측지점 (JW, GNR, JD)에 대한 SS(mg/L) 농도 자료를 이용하여 보정하였다. 유사량 보정 후 T-N(mg/L), T-P(mg/L) 자료를 이용하여 영양물질에 대한 부하량 보정을 실시하였으며, 보정 매개변수로는 T-N의 경우 기저유출에서의 질소의 양, 토양 내의 질소의 양 및 하천 내 유기질소 관련 매개변수, T-P도 토양 및 지하수 및 하천에서의 유기인의 양을 조정하였다. 모형의 적용성 평가는 결정계수(R²)를 사용하였으며, 분석결과 SS는 0.67~0.94, T-N은 0.59~0.79, T-P는 0.61

~0.79의 통계치를 보였다(표 2).

2. 토지이용변화에 따른 SWAT 모형의 수문·수질 모의 결과

본 연구에서는 수문·수질 건전성 산정에 앞서, 분포형 수문모형인 SWAT 모형을 이용하여 1985년부터 2005년의 토지이용 변화에 따른 수문·수질 모의를 실시하였다. 금강권역의 토지이용은 도시화 및 댐 개발 등으로 고도화가 진행되었다. 표 3은 WAMIS에서 제공하고 있는 금강권역의 연도별 토지이용 자료를 정리한 것으로, 1975년 산림면적은 전체의 65%가

TABLE 3. Land Use of Geum River Basins (Unit km²)

Year	Area	Urban	Paddy	Crop	Forest	Grass	Wetland	Bare field	Water
1975	9,935.71	315.45	1,491.30	992.92	6,454.73	19.52	0.85	179.66	481.28
1980	9,937.22	307.64	1,500.95	985.8	6,441.75	17.77	1.44	348.11	333.76
1985	9,931.77	430.07	1,481.94	960.12	6,396.77	35.29	1.44	0.00	626.14
1990	9,927.53	481.8	1,485.30	920.82	6,340.25	44.76	1.2	0.00	653.4
1995	9,902.28	565.98	1,464.29	883.11	6,320.14	50.05	0.9	0.00	617.81
2000	9,898.22	635.69	1,429.92	868.73	6,276.31	60.09	1.07	0.00	626.41
2005	9,898.27	711.98	1,393.64	846.52	6,246.97	68.45	0.95	0.00	629.76
2010	9,899.63	784.02	1,347.96	819.11	6,210.03	74.89	0.67	11.72	651.23
2015	9,915.49	902.43	1,309.57	808.24	6,134.78	86.89	16.62	0.67	656.29

산림이었으나, 2015년은 62%로 매년 감소하는 추세를 보였다. 이와 반대로 시가지의 경우 매년 증가하여 2015년에는 전체 면적의 9%를 차지하는 것으로 나타났는데, 이는 세종특별자치시 설치로 인한 택지개발로 시가지 면적이 증가하였기 때문이다.

본 연구에서는 과거 토지이용변화에 따른 수문·수질 분석에 앞서 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하고 있는 1985~2000년 대분류 토지이용도와 환경부 환경공간정보서비스에서 제공하고 있는 2008년 토지이용도를 수집하였다. WAMIS에서 제공되는 대분류 토지피복 분류체계는 8개 항목으로 시가지, 논, 밭, 산림, 초지, 습지, 나지, 수역이다 (Yoo *et al.*, 2018). 2013년 구축 중인 토지이용도는 금강 유역의 일부가 미구축 되어 본 연

구에서 활용하지 않았다.

토지이용도는 1985~2008년 동안의 토지이용도 5개를 활용했다. SWAT 모형 모의 시 기상자료는 1981년부터 2010년으로 고정하여 동일 기상조건하에 토지이용만 변화했을 경우의 수문·수질 변화를 분석할 수 있도록 설정하였다.

표 4는 토지이용변화에 따른 SWAT 모형의 수문·수질 모의 결과를 정리한 것으로서, 1985년 대비 2008년의 총유출량, 침투량, 토양수분, 지하수흐름은 각각 2.9%, 6.8%, 3.0%, 10.0% 감소한 것으로 모의된 반면 지표유출량은 40.6% 증가한 것으로 분석되었다. 1985년의 경우 도시지역 면적은 금강유역 전체면적의 4.3%(430.07km²)를 차지하고 있으나, 2010년의 경우 7.9%(784.02km²) 2015년은

TABLE 4. The results of hydrology and water quality by landuse change

Component	1985	1990	1995	2000	2008
Precipitation			1,265.5		
Total Runoff	763.0	763.3 (-0.04%)	763.3 (-0.04%)	761.6 (-0.2%)	740.5 (-2.9%)
Infiltration	749.5	740.4 (-1.2%)	740.1 (-1.3%)	728.4 (-2.8%)	698.3 (-6.8%)
Evapotranspiration	486.7	486.4 (-0.1%)	487.2 (0.1%)	451.6 (-7.2%)	505.9 (3.9%)
Surface Runoff	64.3	73.3 (14.0%)	73.6 (14.5%)	81.7 (27.1%)	90.4 (40.6%)
Percolation	368.1	360.1 (-2.2%)	359.5 (-2.3%)	347.8 (-5.5%)	332.6 (-9.6%)
Soil water	114.0	114.0 (-)	113.7 (-0.3%)	111.6 (-2.1%)	110.6 (-3.0%)
Lateral flow	366.3	365.1 (-0.3%)	365.4 (-0.2%)	366.5 (0.1%)	350.8 (-4.2%)
Revap	15.2	15.2 (-)	15.2 (-)	14.1 (-7.2%)	14.9 (-2.0%)
Groundwater Recharge	20.5	20.0 (-2.4%)	20.0 (-2.4)	20.4 (-0.5%)	18.4 (-10.2%)
Groundwater flow	332.4	324.8 (-2.3%)	324.3 (-2.4%)	332.4 (-)	299.3 (-10.0%)
SS	24.2	37.7 (+13.5 mg/L)	40.0 (+15.8 mg/L)	45.9 (+21.7 mg/L)	48.7 (+24.5 mg/L)
T-N	4.40	4.51 (+0.11 mg/L)	4.43 (+0.03 mg/L)	4.33 (-0.07 mg/L)	4.93 (+0.53 mg/L)
T-P	0.05	0.06 (+0.01 mg/L)	0.06 (+0.01 mg/L)	0.05 (-)	0.07 (+0.02 mg/L)

9.1%(902.43km²)까지 증가하였다. 이는 도시화로 인한 불투수지역의 증가로 강우의 지하침투량의 저하와 더불어 지하수위에 영향을 주어 지하수 흐름이 감소한 반면 홍수기에는 유출률이 증가하게 되었기 때문으로 판단된다(Kim *et al.*, 2005). 또한 증발산량 역시 미래로 갈수록 3.9% 증가하였는데, 이는 산림과 농경지가 줄어들면서 도시면적은 커졌지만 초지면적이 증가함에 따라 증발산량 증가에 영향을 미친 것으로 판단된다(Ahn *et al.*, 2015)

수질모의 결과는 과거에서 미래로 갈수록 점차 증가하는 패턴을 나타내었는데, 1985년에 비해 2008년의 SS, T-N, T-P는 각각 24.5 mg/L, 0.53 mg/L, 0.02 mg/L 증가하였다. 도심지 증가에 따른 주거 및 상업지역에서 강우 유출수와 오염물질 배출 특성을 살펴보면, 해당 지역의 인구밀도 및 경제활동 정도에 따라 다양하나 대부분의 도시지역은 주차장과 도로 등의 불투수면적 증가로 강우에 대한 유출 및 유량과 수질농도의 변화가 빠르게 나타나며, 특히 도시지역은 오염물질이 강우초기에 일시에 배출되는 초기유출현상이 두드러짐에 따라 최대

오염유출이 발생하여 하천에 큰 영향을 주게 된다(Park *et al.*, 2008). SWAT 모형에서는 지표유출에 의한 오염부하량을 축적(Build up)과 쓸림(Washoff) 기능을 이용하여 산정함에 따라 불투수지역에 증가에 따른 지표유출량의 증가로 수질(SS, T-N, T-P) 모의결과 또한 증가한 것으로 판단된다.

3. 토지이용변화에 따른 수문·수질 건전성 변화

본 연구에서는 1985년 토지이용을 적용한 결과를 가장 자연적인 조건에서의 기준값으로 정의하고 1985년 대비 1990~2008년의 수문·수질 유역건전성을 도출하였다. 그림 2는 1985년 SWAT 수문 모의 결과를 기준값으로 1985-2008년에 대한 수문 유역건전성 지수를 산정한 결과이다. 여기서 유역건전성은 1로 갈수록 건강한 유역임을 의미한다. 토지이용 변화에 따른 건전성 변화 분석결과, 1990년, 1995년, 2000년에는 기준값인 1985년과 동일하게 수문 유역건전성 지수의 범위가 0~1로 분석되었으나, 2008년의 경우 0~0.94의 범위로 분포되어 전체적으로 유역 건전성이 악화된 것으로

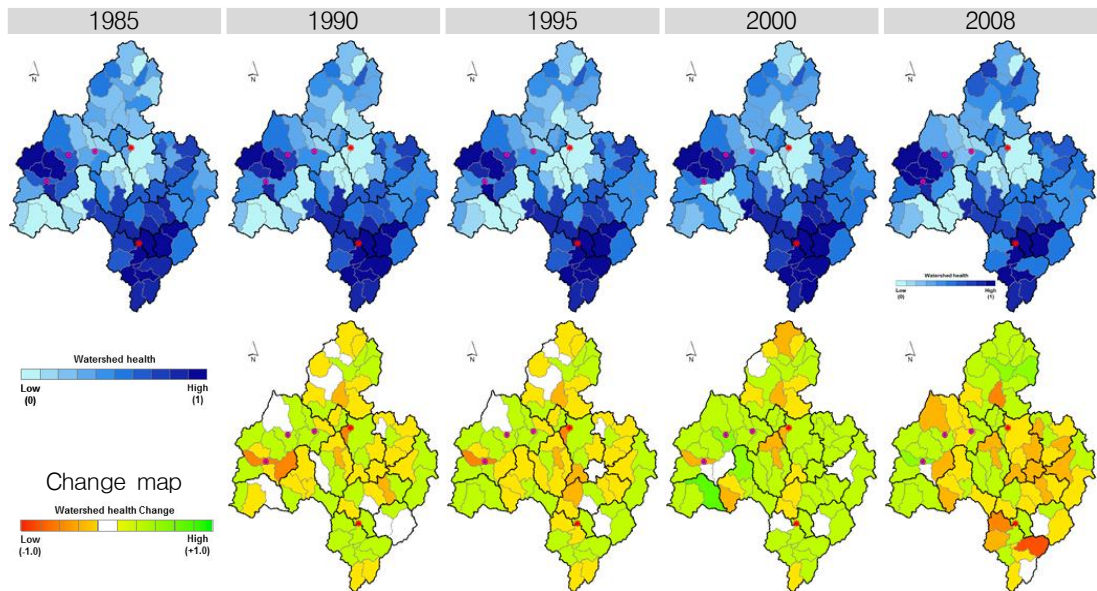


FIGURE 2. Watershed health index results for the hydrology

나타났다. 특히, 1985년~2000년까지 용담댐 상류 유역의 수문 건전성은 건강한 것으로 나타났다으나, 용담댐 준공 이후인 2008년 모의 결과 건전성은 매우 악화된 것으로 분석되었다.

그림 2의 하단은 1985년을 기준으로 연도별로 변화 값을 나타낸 것으로 빨간색은 건전성이 악화된 표준단위유역, 초록색은 건강해진 유역을 의미한다. 1990년의 경우 1985년에 비해 금강 하류의 건전성이 악화한 것으로 분석되었고, 2000년도에는 유역 전반에 걸쳐 건전성이 회복된 것으로 나타났다. 건전성이 제일 악화한 것으로 분석된 2008년은 용담댐 상류와 대청댐 상류에 걸쳐 매우 나빠진 것을 확인할 수 있다. 이와 더불어 도시화가 많이 진행된 대전, 청주지역 역시 수문 건전성이 악화된 것으로

분석되었는데, 이는 Park *et al.*,(2005)의 연구결과에서 처럼 도침지의 증가와 산림지역의 감소에 따른 침투량이 작아져 지하수충전량이 줄어들어 따라 기저유출량이 감소하였기 때문으로 판단된다.

수질 건전성 변화를 살펴보기 위해 평가된 금강유역의 수질 건전성에 대한 통계치(표 5)와 평가된 금강유역 내 수질 건전성지수의 분포를 살펴보기 위한 수질 항목별 건전성 누적 분포곡선을 도시하였다(그림 3). 수문건전성 산정방법과 마찬가지로 1985년 토지이용도를 이용하여 모의한 SWAT의 SS, T-N, T-P 결과 값을 이용해 산정한 수질건전성 지수를 기준으로 1990~2008년에 대한 SS, T-N, T-P 수질 건전성지수를 산정하였다.

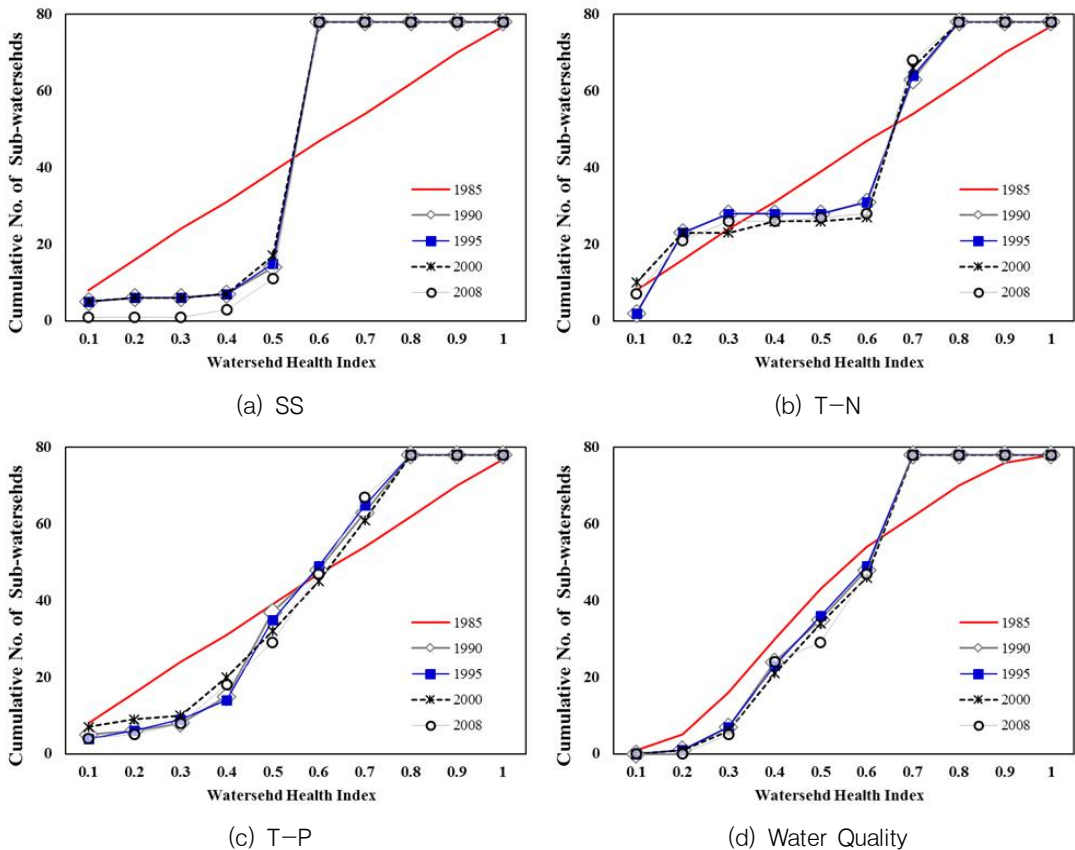


FIGURE 3. The Cumulative curve of watershed health index results for water quality

TABLE 5. Watershed health index results for the water quality

Component		1985	1990	1995	2000	2008
SS	Max.	1.00	0.59	0.58	0.59	0.58
	Avg.	0.50	0.51	0.51	0.51	0.53
	Min.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T-N	Max.	1.00	0.73	0.73	0.73	0.73
	Avg.	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	Min.	0.00	0.07	0.07	0.00	0.05
T-P	Max.	1.00	0.77	0.77	0.77	0.77
	Avg.	0.50	0.51	0.51	0.52	0.52
	Min.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Quality	Max.	1.00	0.69	0.69	0.69	0.69
	Avg.	0.50	0.51	0.51	0.51	0.52
	Min.	0.00	0.19	0.19	0.19	0.24

수질건전성 분석결과를 살펴보면 1985년에 비해 2008년의 SS, T-N, T-P 건전성 지수는 최대값은 각각 -0.42, -0.27, -0.23 감소한 반면, SS와 T-P의 건전성 평균값의 경우 각각 0.03 0.02 상승하였다. 이는 그림 3(a)에서와 같이 1985년 대비 1990~2008년의 SS에 대한 건전성지수는 0.5~0.6에 집중적으로 분포되어 평균값은 상승하였으나, 가장 건강함을 나타내는 1에 해당하는 유역은 단 한 개의

소유역도 나타나지 않아 전체적으로는 SS 건전성이 나빠진 것으로 분석되었다.

2008년 토지이용기반의 T-P의 유역 평균 건전성은 0.52로 1985년에 비해 0.2 상승한 것으로 계산되었으나, 그림 3(c)에서와 같이 금강유역 내 T-P 건전성지수가 대부분 0.4~0.7 구간에 분포되어 있어 평균값이 상승한 것으로 판단된다.

SS, T-N, T-P 각각의 건전성 지수를 토대

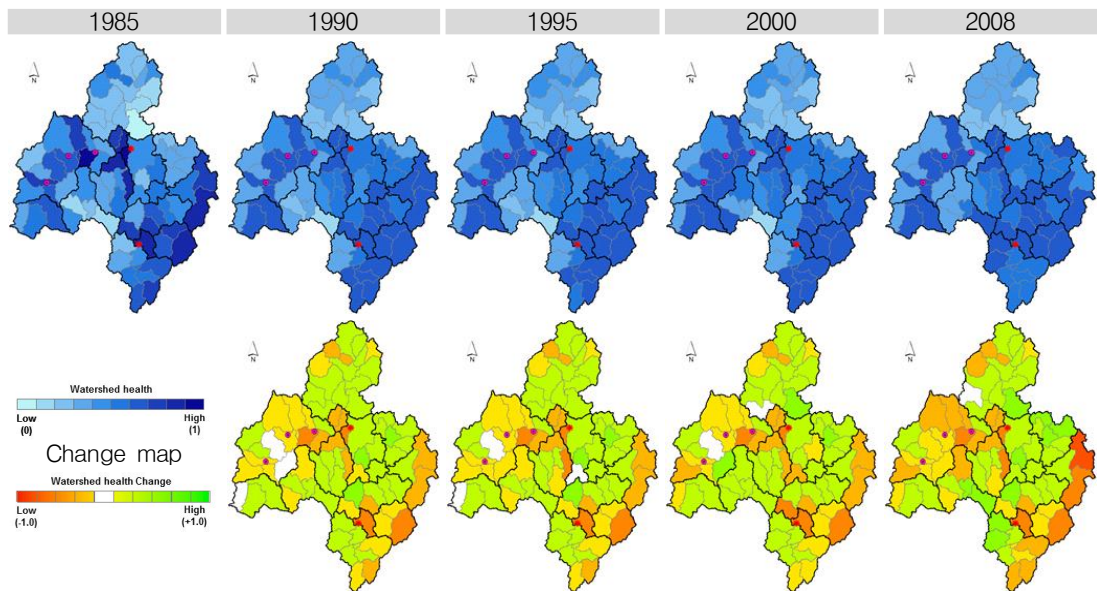


FIGURE 4. Watershed health index results for the integrated watershed health

로 수질에 대한 종합적인 건전성 지수를 산정한 결과, 과거(1985년) 대비 현재(2008년)의 금강유역의 평균 수질 건전성은 0.5에서 0.52로 0.02 상승하였으나, 유역 내 최대 건전성은 1.0에서 0.69로 하락한 것으로 분석되었다. 즉 현재(2008년) 금강유역 내 수질이 가장 좋은 유역은 과거(1985년) 금강유역 내 건전성이 0.65에 해당하는 수치로 수질이 매우 나빠진 것을 의미하며, 이는 Park *et al.*(2009)이 제시한 연구결과와 같이 불투수지역의 증가로 인해 수질 농도의 변화가 유출량의 변화보다 변화의 폭이 월등하게 크게 나타난 것으로 분석된다.

수문·수질에 대해 산정한 건전성 지수를 이용하여 1개의 통합 유역건전성 지수를 도출하였으며, 이를 공간분포하여 건전성이 변화한 유역을 도출하였다(그림 4). 분석결과 기준년도인 1985년에 비해 건전성지수의 분포 범위가 변화하였는데 2008년의 경우 건전성지수의 분포 범위가 0.20~0.77로 가장 크게 나타났다. 과거부터 현재까지 건전성이 가장 악화된 것으로 분석된 대청댐 상류와 용담댐유역은 동일 기상조건 하에 토지이용만 변화했을 시에도 수문·수질 건전성의 변화가 매우 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 대청댐 상류와 용담댐 유역은 선행연구(Kim *et al.*, 2012; Jung and Park, 2009)를 통해 질소의 과잉 공급, 녹조 등 수질오염 문제가 제기되어온 바, 도시화와 그에 따른 수문요소의 변화는 수질 악화 및 녹조 발생 등 수질환경에 큰 영향을 준 것으로 판단된다. 또한 대전, 세종시 등 도시화로 인해 금강유역의 중권역의 유역건전성이 취약해졌고, 하류에도 영향을 미쳐 건전성이 점차 나빠진 것으로 분석되었다.

요약 및 결론

본 연구에서는 Ahn and Kim(2017)이 제안한 유역건전성 평가지수 6개 중 수문, 수질 2개의 유역건전성 평가지수를 대상으로 다변수 정규분포를 통해 기준값(reference value)에 대한 확률밀도함수를 산정하여 장기간 환경변

화에 의한 건전성 변화 분석이 가능하도록 기존 유역건전성 지수를 개선하여 토지이용변화에 따른 수문 수질 건전성을 평가하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 본 연구에서는 과거 토지이용변화에 따른 수문·수질 분석에 앞서 WAMIS에서 제공하고 있는 1985~2000년 대분류 토지이용도와 2008년 환경부 토지이용도를 수집하고 기 검보정된 SWAT 모형을 이용하여 동일 기상조건(1981~2010)하에 토지이용변화에 따른 수문·수질의 변화를 분석하였다. 분석결과 1985년 대비 2008년의 총유출량, 침투량, 토양수분, 지하수흐름은 감소하였으나 지표유출량과 수질농도(SS, T-N, T-P)는 증가한 것으로 분석되었다.

둘째, 수문·수질 건전성 분석에 앞서, 기존 유역건전성 평가지수의 상대평가 알고리즘을 개선하기 위해 다변량 정규분포 확률함수를 적용하였다. 1985년 토지이용을 적용한 결과를 가장 자연적인 조건에서의 참조결과(standard)로 정의하고 참조결과와의 이변량 확률밀도함수에 적용하여 유역건전성 index score를 예측하도록 개선하여 1985년부터 2008년 토지이용변화에 따른 유역 수문·수질 건전성의 상대적인 비교가 가능하도록 하였다.

셋째, SWAT 모형의 모의결과와 개선된 유역건전성 평가방법을 토대로 수문·수질에 대한 건전성 분석결과 기준년도인 1985년에 비해 건전성지수의 분포범위가 변화하였는데 특히 2008년 건전성지수의 분포범위가 0.20~0.77로 가장 크게 나타났다. 건전성이 가장 악화된 것으로 분석된 대청댐 상류와 용담댐유역은 동일 기상조건 하에 토지이용만 변화했을 시에도 수문·수질 건전성의 변화가 매우 크게 나타났다.

Ahn and Kim(2017)이 제안한 방법은 분석 시기별 유역건전성 지수의 분포값이 모두 0~1로 산정됨에 따라, 분석하는 시점에 대한 유역 내 소유역별 유역 건전성의 상대적인 비교만 가능했다. 이는 현재 상태에 대한 소유역별 유역 건전성의 비교 시 활용할 수 있으나, 과거부

터 현재 뿐만아니라 미래의 장기적인 유역환경의 변화 분석 시 시점별 등급기준이 변화함에 따라 기준값이 부재하는 한계점이 존재했다. 본 연구에서는 이를 개선하여 기준값(reference value)에 대한 시점별 환경변화에 의한 절대적인 건전성 변화분석이 가능하도록 하였다. 이를 통해 연대별, 혹은 평가기간별 분석 시 기준이 되는 기준값을 제공할 수 있으며 동일한 유역에 대한 절대 비교가 가능하도록 개선하였다. 따라서 과거 자연상태 대비 인간활동에 의한 유역 환경변화를 감지할 수 있으며, 어떠한 인자가 유역 건전성에 영향을 미치게 되었는지 분석이 가능하다.

본 연구에서는 선행연구에서 평가한 6개의 sub-index 중 2개만을 선정하여 분석하였으나, 향후 토지피복, 식생, 하천, 서식지, 수생태에 대한 기준값 대비 유역건전성 변화분석이 가능하며 이를 기반으로 유역관리를 위한 의사결정자료의 생산이 가능할 것으로 판단된다. 다만, 기준값에 대한 모델링 결과 및 토지이용변화 등 사용한 자료에 대한 불확실성이 존재함에 따라 신뢰성있는 평가결과 도출을 위한 연구가 꾸준히 이뤄져야 할 것으로 생각된다. 특히 수문·수질 관측자료의 경우 국가포털을 통해 1990년대부터 자료가 제공됨에 따라 해당 기간을 고려하여 기준값을 산정한다면 보다 신뢰성 있는 수문·수질 건전성 결과를 도출할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 본 연구에서는 기준값 산정 시 적용한 확률분포방법에 대한 통계적 적정성에 대한 검증이 충분히 수행되지 않은 바, 향후 다양한 통계방법에 대한 검증도 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다. 향후 불확실성에 대한 정확도 향상과 더불어 수문·수질 모형의 전국구축이 이뤄진다면 전국의 수문/수질과 관련된 유역건전성 평가에 대하여 장기적인 변화분석이 가능할 것으로 기대된다. **KAGIS**

REFERENCES

- Ahn, S.R. and Kim, S.J. 2017. Assessment of integrated watershed health based on the natural environment, hydrology, water quality, and aquatic ecology. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 1607, 7938.
- Ahn, S.R., Jang, C.H., Lee, J.W. and Kim, S.J. 2015. Assessment of Climate and Land Use Change Impacts on Watershed Hydrology for an Urbanizing Watershed, *The Korean Society of Civil Engineers*, 35(3):567-577. (안소라, 장철희, 이준우, 김성준. 2015. 기후변화와 토지이용변화가 도시화 진행 유역수문에 미치는 영향 평가. *대한토목학회논문집*, 35(3):567-577)
- Choi, W.H., Shin, J.W., OH, H.J., Choi, M, H. and Park, J.W. 2009. A Study of Index and Method for Estimating the Rate of Rehabilitated Hydrological Cycle, *The Korean Society of Civil Engineers Conference Proceedings*, 2114-2117 (최원호, 신자원, 오현제, 최민하, 박주양, 2009. 물순환 건전성 평가를 위한 지표 및 기법 연구: 경안천 유역 물순환 건전성 변화 모의, *대한토목학회 학술대회*, 2114-2117)
- Gokhale, D.V., Ahmed, N.A. *et al.*, 1989, Res, B.C., and N.J. Piscataway(1989). Entropy expressions and their estimators for multivariate distributions, *Information Theory, IEEE transactions*, 35(3), pp. 688-692.
- Jung, J.S. and Park Y.K. 2009. Water quality prediction at upstream basin of Yongdam dam, *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*, 10(1):23-29 (정재성, 박영기. 2009. 용담댐 상류유역에서의 수질예측. *한국환경기술학회지*, 10(1):23-29)
- Kim, K.H., Lee, J.H. and Ahn, G.K. 2012. Spatio-temporal Fluctuations with Influences

Ahn, S.R. and Kim, S.J. 2017. Assessment

- of Inflowing Tributary Streams on Water Quality in Daecheong Reservoir, Korean Journal of ecology and environment, 45(2):158-173 (김경현, 이재훈, 안광국. 2012. 대청호의 시공간적 수질 변화 특성 및 호수내 유입지천의 영향. 생태와 환경, 45(2):158-173)
- Kim, K.H., Park, J.Y. and Oh, J.M, 2005. Analysis the causes of drying stream in Kyunan-Cheon, Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water Wastewater Conference Proceedings, 637-640 (김경희, 박재영, 오종민. 2005. 상수원 수질관리; 경안천 건천화 원인 분석. 한국물환경학회?대한상하수도학회 공동 춘계 학술발표회, 637-640.)
- Kim J.H. 2011. R Multivariate statistical analysis, Seoul. Kyowoo (김재희. 2011. R 다변량 통계분석. 서울: 교우사)
- Lee, J.M., Lee, S.H. and Lee, K.S. 2006. Hydrologic Cycle Simulation of Urban river for Rehabilitation of Water Environment(1) - Anyangcheon Basin-, Journal of Korean Society on Water Quality, 22(2):349-357 (이정민, 이상호, 이길성. 2006. 물 환경 건전화를 위한 도시 하천의 물 순환 모의(1)-안양천 유역. 한국물환경학회지, 22(2):349-357)
- Lee, J.W., Jung, C.G., Kim, D.R., Kim, S.J. 2018. Assessment of future climate change impact on groundwater level behavior in Geum river basin using SWAT. Journal of Korea Water Resources Association, 51(3):247-261 (이지완, 정충길, 김다래, 김성준, 2018. SWAT을 이용한 미래기후변화에 따른 금강 유역의 지하수위 거동 평가, 한국수자원학회 논문집, 51(3):247-261)
- Lee, S.H. and Lee, J.M. 2006. Hydrologic Cycle Simulation of Urban River for Rehabilitation of Water Environment (2) - Dorimcheon Basin -, Journal of Korean Society on Water Enviroment, 22(2):815-823 (이상호, 이정민. 2006. 물 환경 건전화를 위한 도시하천의 물 순환 모의 (II) -도림천 유역-, 수질보전 한국물환경학회지 22(2):815-823)
- Lee, Y.J., Park, M.J., Park, K.W., and Kim, S.J., 2008. Analysis of Hydrologic Behavior Including Agricultural Operation using SWAT model, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 11(1):20-30 (이용준, 박민지, 박기욱, 김성준. 2008. 농업용 저수지 운영을 고려한 SWAT 모형의 수문학적 거동 분석, 한국지리정보학회지, 11(1):20-30)
- Ministry of Environment, 2003. Development of water quality plan for small and medium watersheds Final Report, 1-2 (환경부, 2003. 중소유역 수질보전계획 수립 기법 개발 최종보고서, 1-2)
- Park, J.Y., Lee, M.S., Lee, Y.J. and Kim, S.J. 2008. The Analysis of Future Land Use Change Impact on Hydrology and Water Quality Using SWAT Model, The Korean Society of Civil Engineers, 28(2B):187-197 (박종윤, 이미선, 이용준, 김성준. 2008. SWAT 모형을 이용한 미래 토지이용변화가 수문-수질에 미치는 영향 분석. 대한토목학회논문집 B, 28(2B):187-197)
- Park, K.S., Chung, E.S., Kim, S.U., Lee, K.S. 2009. Effect of Climate Change and Urbanization on Flow and BOD Concentration Duration Curves, Journal of Korea Water Resources Association, 42(12):1091-1102 (박경신, 정은성, 김상

- 육, 이길성. 2009. 기후변화 및 도시화에 따른 유황곡선 및 BOD 농도지속곡선 변화. 한국수자원학회 논문집, 42(12):1091-1102)
- Park, M.J, Kwon, H.J. and Kim, S.J. 2005. Analysis of Impacts of Land Cover Change on Runoff Using HSPF Model, Journal of Korea Water Resources Association, 38(6):495-504 (박민지, 권형중, 김성준. 2005. HSPF 모형을 이용한 토지피복변화에 따른 유출 변화 분석. 한국수자원학회 논문집, 38(6):495-504)
- Seo, D.I., Yun, J.U., and Lee, J.W. 2008. Comparative Analysis of QUAL2E, QUAL2K and CAP Steady State Water Quality Modeling Results in Downstream Areas of the Geum River, Korea. Journal of Korean Society of Water and Wastewater, 22(1):121-129 (서동일, 윤종욱, 이재윤. 2008. QUAL2E, QUAL2K 및 CAP 모델을 이용한 금강 하류 하천구간 정상상태 수질모델링 결과 비교 분석, 상하수도회지, 22(1):121-129)
- Seo, D.I. 2009. The Necessity of Stream Management for River Management in Korea, Water Future, 42(5):18-22 (서동일, 우리나라 하천관리를 위한 소하천 관리의 필요성. 물과미래, 42(5):18-22)
- Shin, H.J., Park, M.J. Lee, J.W., Hwang, E.H., Kang, S.M., and Chae, H.S. 2018. Evaluation of Accuracy Improvement of SWAT Model for the Yongdam-Dam Watershed based on Multi-Point Hydrological Observations, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 23(1):103-117 (신형진, 박민지, 이지완, 황의호, 강석만, 채효석. 2018. 용담댐유역의 다지점 유량관측 자료 이용에 따른 SWAT 모형의 정확도 향상성 평가. 한국지리정보학회지, 21(3):103-117)
- U.S. EPA. 2012. Identifying and Protecting Healthy Watersheds: Concepts, Assessments, and Management Approaches. EPA 841-B-11-002.
- Yoo, J.H., Kim, K.H., Park, Y.G., Lee, G.H., Kim, S.J., Jung, C.G. 2018. A Study on the Use of GIS-based Time Series Spatial Data for Streamflow Depletion Assessment, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 21(4):50-63 (유재현, 김계현, 박용길, 이기훈, 김성준, 정충길. 2018. 하천건천화 평가를 위한 GIS 기반의 시계열 공간자료 활용에 관한 연구, 한국지리정보학회지, 21(4):50-63). **KAGIS**