

Research Paper

금강유역의 하천 종합건전성 평가

– 생태적 건전성 및 물 복지를 중심으로 –

김흥명 · 하성룡

충북대학교 도시공학과

Assessment of the Freshwater Comprehensive Soundness in the Geum River Basin

– Focusing on Ecological Soundness and Water Welfare –

Hong-Myung Kim · Sung-Ryong Ha

Dept. of Urban Engineering, Chungbuk National University

요약: 하천 건전성은 하천 생태계의 건강성과 인간의 물 이용에 대한 사회적 서비스 즉, 물 복지로 크게 구분할 수 있다. 본 연구에서는 하천의 생태적 건전성 및 물 복지 지수를 산정하고 4분면 모형을 이용하여 금강수계 14개 중권역에 대한 하천 종합건전성을 분석하였다. 하천의 생태적 건전성은 댐상류(대청댐 기준) 지역이 상대적으로 ' 좋음'으로 나타났으며 댐하류 지역은 '나쁨' 상태로 평가되었다. 반면, 물 복지는 인구 규모가 큰 댐하류 지역이 상대적으로 ' 좋음' 상태였으며 댐상류 지역은 상대적으로 물 복지 수준이 '나쁨'으로 나타났다. 하천 종합건전성은 무주남대천, 보청천, 대청댐 유역이 생태적 건전성 및 물 복지 수준이 모두 양호했으며 금강공주, 논산천, 금강하구언 유역은 모두 불량한 것으로 나타났다. 갑천 유역은 지속적인 투자와 체계적인 관리로 2014년에는 두 지수 모두 양호한 것으로 나타났다. 따라서 벤치마킹을 통한 타 유역으로의 활용방안을 모색해야 할 필요가 있다.

주요어: 하천 종합건전성, 생태적 건전성, 물 복지, 유역관리

Abstract: Freshwater soundness can be broadly divided into the health of river ecosystems and social services for human water use, that is, water welfare. In this study the ecological soundness and water welfare index of rivers were calculated, and the freshwater comprehensive soundness was analyzed using the quadrant model for 14 basins in the Geum River basin. As for the ecological soundness of the river, the area upstream of the dam (based on Daecheong Dam) was evaluated as 'good', and the area downstream of the dam was evaluated as 'bad'. On the other hand as for water welfare, the area downstream of the dam with a large population was in a relatively 'good' condition, and the area upstream of the dam had a relatively 'poor' level of water welfare. In terms of freshwater comprehensive soundness, it was found that the basins of Mujunamdaecheon, Bocheongcheon and

Daechongdam showed good ecological soundness and water welfare, and the Geumganggongju, Nonsancheon and Geumganhagueon basins were all poor. The Gapcheon basin showed good results in 2014 due to continuous investment and systematic management. Therefore, it is necessary to find ways to utilize it for other watersheds through benchmarking.

Keywords : Freshwater comprehensive soundness, Ecological soundness, Water welfare, River basin management

I. 서론

하천의 건강한 생태계가 제공하는 재화와 서비스를 되돌릴 수 없는 상태로 훼손시키지 않고 물, 식량, 에너지에 대한 인간의 수요를 충족시키는 일은 매우 어려운 문제이다. 인간의 개입에 의한 수질오염으로 사람의 물 이용에 따른 지장뿐만 아니라, 수생태계 건강성과 기능에도 심각한 문제를 낳고 있다. 기후변화와 더불어 인간의 활동은 담수 생태계의 다양성을 감소시키고 있다. 결과적으로 생태계 서비스에 대한 제공 능력의 감소 및 인간의 복지에 부정적인 영향이 초래되고 있다(Chang and Bonnette 2016; KEI 2017).

환경적 가치(environmental values)는 건강한 생태계 또는 공공의 이익, 복지, 안전, 건강을 위해 중요하며 오염, 폐기물 배출 및 퇴적물의 영향으로부터 보호해야 하는 환경의 특정 가치 또는 용도이다. 주요 환경적 가치는 수중 생태계 보호, 문화, 영적 가치, 작물 관개, 식수 및 수중 놀이와 같은 다양한 물 이용에 의한다(ANZECC 2020). 하천 생태계 및 서비스의 약화는 물 안보와 생물 다양성을 위협하는 주요한 원인이며 담수 관리를 위해 통합적인 해결의 필요성이 증가하고 있다(Vörösmarty et al. 2010).

하천 건강성에 대한 평가는 그 목적 및 범위에 따라 다양하게 나타나고 있다. 1972년에 발표된 미국의 청정수법에서는 하천 건강성(river health)을 ‘물의 화학적, 물리적, 생물학적 온전성을 회복하고 유지하는 것’을 목적으로 한다. 여기서 “건강(health)”이라는 단어는 “좋은 상태(good condition)”의 줄임말을 의미하며 “온전성(integrity)”은 생물학적으로 인간 교란의 정도가 최소가 되는 상태를 의미한다. 따라서 생물학적 온전성은 어떤 임계점을 기준으로 “건강한

(healthy)” 또는 “건강하지 않는(unhealthy)” 상태를 의미한다(Karr 1999). Vollmer et al. (2018)은 “담수 건강성(freshwater health)”을 담수 생태계의 효과적인 관리와 거버넌스를 통해 지속적이고 공평하게 생태계 서비스와 혜택을 제공할 수 있는 능력으로 정의하였다. 기존의 생태학적, 수문학적 분야에 사회적 분야의 매개변수를 연결한 생태-사회학적 개념을 도입하여 담수 계통의 지속가능한 관리를 위해 인간의 물 사용, 담수 생태계 및 거버넌스 간의 상호작용을 분석하였다.

우리나라는 물환경보전법에서 하천 건강성에 대해 “수생태계를 구성하고 있는 요소 중 환경부령으로 정하는 물리적·화학적·생물학적 요소들이 훼손되지 아니하고 각각 온전한 기능을 발휘할 수 있는 상태”로 규정하고 수생태 건강성(aquatic ecosystem health) 관점에서 정의하고 있다. 여기서 “환경부령으로 정하는 물리적·화학적·생물학적 요소”란 부차돌말, 저서성 대형무척추동물, 어류, 수변식생, 서식 및 수변환경, 수질 등의 요소를 말한다(Kim 2020).

물 복지는 “국민이 사회·경제적인 격차나 지역적인 차이 없이 모두 건강한 물을 공급받을 수 있으며, 물로 인한 혜택이 골고루 분배되며 안전하게 물을 이용할 수 있는 것”으로 정의되어 진다(KWRC 2018). 물의 공급과 이용에 따른 적절한 요금체계와 깨끗하고 안정적인 수자원의 공급, 물 환경 그리고 정부의 지속적인 투자로 인한 쾌적한 환경의 조성 등이 국가가 국민의 삶의 질 향상을 위해 제공하는 복지 개념이라 할 수 있다(Lee et al. 2021). 물 복지는 “현재와 미래의 모든 국민이 언제나 물이 제공하는 높은 수준의 혜택에서 배제되지 않고 보다 나은 삶의 질을 보장받는 것”으로 해석할 수 있으며 물 복지를 구성하는 핵심

요소로 형평성, 안정성, 건강성 부문으로 구분할 수 있다(Choi et al, 2020). Lee et al. (2021)은 지역별 수자원의 특성, 물공급 및 처리를 위한 기반시설의 조성, 용수공급의 특성, 물이용자의 특성, 물의 공급 및 처리를 위한 경제성을 대분류로 설정하고 25개의 지표를 선정하여 물 복지를 평가하였다. 반면, 하천 생태계 시스템의 건강성과 인간의 물 이용에 대한 서비스를 포괄하는 종합적인 연구도 병행하여 진행되고 있다. 한국 환경연구원에서는 지속 가능한 물 이용 관점에서 물의 수요 및 공급 측면과 아울러 수질, 유역 환경, 거버넌스를 포함하여 지속가능성 개념을 구현할 수 있는 지표의 개발과 지수체계를 구성하여 평가하였다(KEI 2014).

본 연구는 하천 생태계의 건강성과 하천이 인간에게 제공하는 사회적 서비스 즉, 물 복지에 대한 지수를 산정하고 금강수계 유역에 대해 수준을 평가한다. 또한, 물 이용에 있어 이원적인 특성을 가진 생태적 건전성 및 물 복지에 대한 하천의 종합적인 건강성을 평가하는 데 목적이 있다.

II. 연구내용 및 방법

1. 연구대상 지역

금강 유역은 유역면적이 9,835.3km², 본류의 유로 연장은 395.9km, 유역의 평균 폭은 24.8km로 남한 전체 면적의 약 10%를 차지하고 있다. 금강 하구로부터 약 150km 상류 지점에 대청댐이 위치하고 대청댐으로부터 190km 상류 지점에 용담댐이 위치한다.

금강 유역은 금강, 삽교천, 금강서해, 새만금 권역으로 구분된다. 이 중 금강권역은 다시 14개 중권역으로 나누어지며 대청댐을 기준으로 상류 지역은 댐상류 유역, 하류 지역은 댐하류 유역으로 구분한다. 댐상류 유역에 해당하는 유역은 용담댐(3001), 용담댐하류(3002), 무주남대천(3003), 영동천(3004), 초강(3005), 대청댐상류(3006), 보청천(3007), 대청댐(3008)으로 8개 중권역이며 댐하류 유역은 갑천(3009), 대청댐하류(3010), 미호천(3011), 금강공주(3012), 논산천(3013), 금강하구(3014)으로 6개 중권역으로 구분된다(Figure 1).

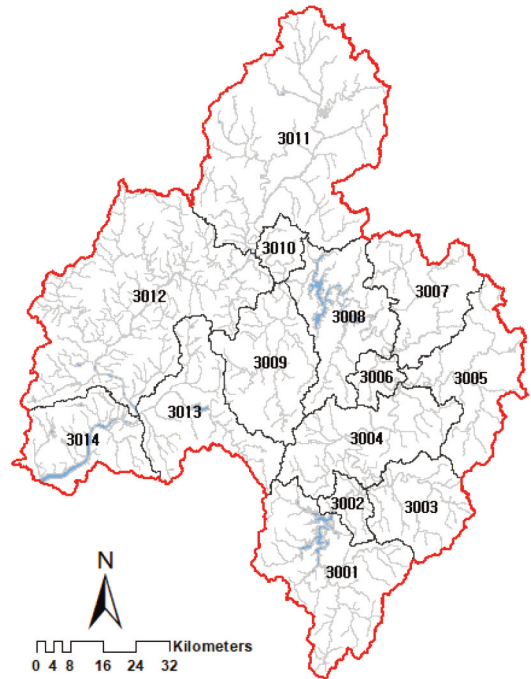


Figure 1. Study area of the Geum River Basin (14 sub-basins)

2. 지표의 구축 및 정규화

1) 지표의 구축

하천의 생태적 건전성 지수(Ecological Soundness Index: ESI)와 물 복지 지수(Water Welfare Index: WWI) 산정을 위해 필요한 지표를 선정하였다. 생태적 건전성 지수의 구성체계는 수량, 수질, 수생태, 서식·수변의 총 4개 부문으로 구성하였다. 수량 부문은 고유량(HF), 저유량(LF), 영유량(PZ), 변동성(CV), 계절성(SP)의 5개 지표, 수질 부문은 생물학적 산소요구량(BOD), 총인(TP), 총대장균군수(TC), 클로로필-a(Chl-a) 및 목표수질 달성도(T-BOD, T-TP)의 6개 지표, 수생태 부문은 부착조류(TDI), 저서성 무척추대형동물(BMI) 및 어류(FAI)의 3개 지표, 서식·수변은 서식및수변환경(HRI)의 1개 지표로 총 15개 지표이다(Table 1).

물 복지 지수의 구성체계는 물공급, 물이용, 물서비스 관리, 물서비스 형평성의 4개 부문, 16개 지표로 구성하였다. 물공급 부문은 우수율, 용수이용계, 물수급률의 3개 지표, 물이용 부문은 1인1일물사용량, 대

Table 1. A framework of indicators for Ecological Soundness Index (ESI)

Dimension	Indicator	Unit	Description
Water quantity	HF (High flow)	-	The index measures the change in high flows under current and unimpacted conditions.
	LF (Low flow)	-	The index measures the change in low flow magnitude under current and unimpacted conditions.
	PZ (zero flow)	-	The differences in the proportion of zero flow occurring under unimpacted and current conditions.
	CV (Variability)	-	The index simply compares the coefficient of variation of monthly flows between current and unimpacted conditions.
	SP (Seasonality)	-	This index provides a measure of the shift in the timing of the maximum flow month and the minimum flow month under both unimpacted and current conditions.
Water quality	BOD	mg/L	Biological oxygen demand
	TP	mg/L	Total phosphorus
	TC	MPN/100mL	Total coliform
	Chl-a	mg/m ³	Chlorophyll-a
	T-BOD	num.	Target satisfaction of water quality (BOD)
	T-TP	num.	Target satisfaction of water quality (TP)
Aquatic ecosystem	TDI	-	Trophic Diatom Index
	BMI	-	Benthic Macroinvertebrate Index
	FAI	-	Fish Assessment Index
Habitat-riparian environment	HRI	-	Habitat-Riparian Index

Table 2. A framework of indicators for Water Welfare Index (WWI)

Dimension	Indicator	Unit	Description
Water supply	RWR	%	Revenue water ratio
	DIW	1000·m ³ /d	The amount of domestic and industrial water usage
	WBR	%	Water balance ratio
Water use	LPCD	ℓpcd	Water use, Liter per capita day
	AWR	m ³ /d	The amount of alternative water resources
	WSR	%	Water supply Rate
	PSP	%	Percentage of sewered population
Water service management	RWC	&	The rate of recovering water cost from water price
	CSS	number	Consumer satisfaction with water service
	WSR	%	Water self-reliance
	SSR	%	Sewage self-reliance
Water service equity	WSSE	%	Water supply and demand rate by the elderly
	AWE	ℓpcd	The amount of water used by the elderly
	WSSR	%	Water supply and demand rate by recipients of basic living
	AWR	ℓpcd	The amount of water used by recipients of basic living

체수원량, 상수도보급률, 하수도보급률의 4개 지표, 물서비스 관리 부문은 서비스만족도, 수도요금 현실화율, 상수도 자립도, 하수도 자립도의 4개 지표, 물서비스 형평성 부문은 노령인구 물수급률, 노령인구

물사용량, 기초생활 수급자 물수급률, 기초생활 수급자 물사용량의 4개 지표다(Table 2). 지표 구축에 필요한 자료는 KWRC (2018)의 “하천 종합건전성 평가 체계 구축” 보고서에서 사용된 자료를 이용하였다.

2) 지표의 정규화

지표의 시간 변화에 따른 절대 비교가 가능하도록 Mazziotta et al. (2018)이 적용한 Min-Max 재조정 방법을 이용하여 지표를 정규화하였다. 주어진 매트릭스, $X = \{x_{ij}\}$ 에서 정규화한 매트릭스 $R = \{r_{ij}\}$ 는 식 (1)과 같다.

$$r_{ij} = \frac{(x_{ij} - Min_{x_j})}{(Max_{x_j} - Min_{x_j})} 60 + 70 \quad (1)$$

여기서, Min_{x_j} 와 Max_{x_j} 는 지표 j 의 “goalposts”다. 지표 j 가 음(-)의 성질이면 식 (1)은 200으로 조정하여 산정한다. 원활한 해석을 위해 “goalposts”는 기준값(예: 주어진 연도의 평균)의 대푯값을 100으로 고정할 수 있으며 다음과 같이 “goalposts”를 설정한다. 모든 단위와 시간을 고려한 지표 j 의 전체 최소값과 최대값을 Inf_{x_j} 와 Sup_{x_j} 로, 지표 j 에 대한 기준값을 Ref_{x_j} 하면 “goalposts”의 범위는 식 (2)와 같다.

$$\begin{cases} Min_{x_j} = Ref_{x_j} - \Delta \\ Max_{x_j} = Ref_{x_j} + \Delta \end{cases} \quad (2)$$

여기서, $\Delta = (Sup_{x_j} - Inf_{x_j})/2$, 정규화된 값은 대략 70~130의 범위에 속하며 100은 기준값이다.

3. 평가 지표 선정

생태적 건전성 및 물 복지 지수를 위한 지표 선정은 요인분석을 통하여 1차 지표를 선정하였다. 1차로 선정된 지표는 다시 상관계수와 각 지표가 종합 지수에 미치는 영향 즉, 비선형 상관비(non-linear correlation ratio)인 S_i 분석을 수행하여 지수 산정을 위한 최종 지표(2차)를 선정하였다. 지표 선정을 위한 집계 방식은 산술 평균, 종합 지수 산정을 위한 집계 방식은 기하 평균을 사용하였으며 가중치는 동일가중치를 적용하였다. 비선형 회귀 적합모형은 벌칙 스플라인(penalized splines) 함수를 적용하여 비선형 상관비를 추정하였다. 지표 산정을 위한 1, 2차 산정결과 및 비선형 상관비 S_i 를 추정하는 상세내용은 Kim (2000), Kim and Ha (2021)가 작성한 논문에 수록되어 있다.

1) 요인분석을 통한 지표 선정

탐색적 요인분석은 잠재변수와 측정지표들 사이

Table 3. Criteria for selecting indicators by Exploratory Factor Analysis

Item	Selection Criteria	Item	Selection Criteria
KMO	≥ 0.5	CM	≥ 0.4
Bartlett's test	p-value ≤ 0.1	EV	≥ 1
MSA*	≥ 0.4		

*: anti-image correlation coefficient

의 관계 분석을 통하여 측정이 잘 이루어질 수 있는 지표들을 선정하는 방법이다. 종합 지수 집계에 필요한 변수(지표)들의 정보를 가장 많이 함축하고 있는 동시에 요인의 개수를 최소화하는 방법으로 분석에 필요한 적절한 요인(변수)의 개수를 결정한다(Choi et al. 2018). 지표 선정을 위한 분석항목으로 KMO 표본 적합도(KMO: Kaise-Meyer-Olkin), Bartlett 단위행렬 검정, 샘플링 적합성 측정(MSA), 공통성(Communality, CM) 및 고유치(Eigen Value, EV)가 있으며 1차 지표 선정을 위한 기준은 Table 3과 같다.

2) 상관계수 및 비선형 상관비 S_i 분석을 통한 지표 선정

(1) 비선형 상관비, S_i

비선형 상관비 S_i 분석은 집계(aggregation) 시, 산정된 종합 지수 값에 대해 각 입력 변수의 중요도(importance)를 측정하는 것이다. 종합 지수에 대해 각 입력 변수 x_i 의 영향은 종합 지수 y 에 대한 변수 x_i 의 의존성(dependence)을 측정하는 것이다(Becker et al. 2017).

정규화된 변수에 대해 산술 집계에 따른 의존 정도를 구하기 위해 집계 모형을 분해하면 식 (3)과 같다.

$$y_i = f(x_{ji}) + \epsilon_j \quad (3)$$

여기서 $f(x_{ji})$ 는 비선형 함수로 x_{ji} 에 대한 y 의 조건부 평균이며 ϵ_j 는 x_i 를 제외한 지표들의 변동을 설명하는 오차다. x_i 에 대한 y 의 선형의존성은 결정계수 R^2 를 이용하여 측정할 수 있다. 결정계수 R^2 은 x 와 y 사이의 공분산과 상관계수를 이용하여 식 (4)와 같이 산정한다.

$$\begin{aligned} cov(y, x_i) &:= E[(y - \mu_y)(x_i - \mu_x)], \\ R_i &:= corr(y, x_i) := \frac{cov(x, x_i)}{\sigma_y \sigma_i} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $corr(y, x_i)$ 는 $[-1, 1]$ 사이의 구간을 가진 피어슨 적률 상관계수로 공분산의 표준화다. x_i 에 대한 y 의 선형 회귀 분석에서 상관계수의 제곱인 선형 결정계수 R_i^2 은 구간 $[0, 1]$ 의 값을 가지는 $R_i^2 = corr^2(y, x_i)$ 이다.

R_i^2 이 일반 선형 회귀모형의 적합 정도(goodness of fit)를 측정하는 것처럼 결정계수는 선형의존성을 측정한다. 식 (4)의 공분산 $cov(y, x_i)$ 및 상관계수 $corr(y, x_i)$, 결정계수 R_i^2 은 모든 선형의존성과 관련된 측정값이다. 따라서, 결정계수 R_i^2 은 식 (5)로 계산할 수 있다.

$$R^2 = \frac{SS_{reg, i}}{SS_{tot}} \quad (5)$$

여기서, $SS_{reg, i} = \sum_{j=1}^n (\hat{f}(x_{i,j}) - \bar{y})^2$ 는 선형 회귀로 설명할 수 있는 제곱의 합(변동), $\bar{y} = n^{-1} \sum_{j=1}^n y_j$ 는 표본 평균, $\hat{f}(x_{i,j}) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{i,j}$ 는 관측되는 y_j 에 대한 선형 적합 회귀 곡선, $SS_{tot} = (y_j - \bar{y})^2$ 는 제곱의 총합이다. 따라서 R^2 은 x_i 에 대한 y 의 선형 회귀 적합으로 설명된 제곱합과 y 의 총 제곱 합의 비율이며 y 와 x_i 사이의 비선형성은 설명하지 않는다.

종합 지수에서 집계 시 일반적으로 선형이지만 x_i 에 대한 y 의 상관관계가 비선형일 경우, R_i^2 은 의존성의 정도를 과소추정(underestimate)하게 된다. 이러한 비선형 상관비 $S_i, i = 1, 2, \dots, d$ 는 1차 감도 지수(the first-order sensitivity index) 또는 주 영향 지수(main effect index)로 널리 알려져 있다(Becker et al. 2015). 종합 지수에 대한 각 변수의 비선형성을

측정하기 위한 비선형 상관비 S_i 는 함수 $f(x_{i,j})$ 가 비선형일 때 선형인 R_i^2 이 S_i 가 되는 비선형 일반화이다. 만약 주어진 변수가 고정된다면 S_i 는 종합 지수에 대하여 기대 분산의 감소(expected variance reduction)로 해석할 수 있으며 식 (6)과 같다.

$$S_i = \eta_i^2 := \frac{V_{x_i}(E_{X_i}(y | x_i))}{V(y)} \quad (6)$$

여기서 X_{-i} 는 변수 x_i 를 제외한 모든 변수(x_1, \dots, x_d)를 포함하는 벡터이며 $E_{X_{-i}}(y | x_i)$ 는 첨자 X_{-i} 와 함께 명시적으로 나타내며 주어진 x_i 의 값에 대한 y 의 기댓값은 X_{-i} 에 대한 기댓값을 나타낸다(여기서, 첨자 x_{-i} 는 생략하고 $E_{X_{-i}}(y | x_i) \equiv E(y | x_i)$ 로 표현). $E(y | x_i)$ 는 x_i 의 함수로 x_i 에 대한 주 효과를 의미하며 $f_i(x_{ij})$ 와 동등하다. 따라서 $E(y | x_i)$ 는 x_i 에 대한 y 의 산점도(scatter plot)로 비선형 회귀 적합에 지나지 않는다. 여기서 j 열의 샘플 포인트 y_j 와 일치하는 회귀 적합 값을 $m_{jk} := \bar{f}_i(x_{ij})$ 라고 두면 상관비 S_i 는 식 (7)과 같이 추정할 수 있다.

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^n (m_{ji} - \bar{m}_i)^2}{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2} \quad (7)$$

여기서, \bar{m}_i 는 m_{ji} 의 평균이다.

(2) 상관관계 및 S_i 에 의한 지표 선정

일반적으로 상관계수 r 값이 0.3 이상 또는 0.8 이하이면 지수 산정을 위한 적합 지표로 볼 수 있다. 상관계수 값이 0.8 이상이면 해당 지표들은 공선성(collinearity)으로 인해 지수 집계 시 이중계산(double counting)이 되어 보상성(compensability) 문제가 발생한다(Kao et al. 2008; Saisana et al. 2011; Greco et al. 2019). 이런 경우 상관계수가 높은 지표들을 하위 부문으로 두고 값들을 평균하여 새

Table 4. Criteria for selecting indicators by the correlation of S_i

Item	Selection Criteria
Minus (-) or weak correlation	<ul style="list-style-type: none"> ● If the correlation coefficient value is 0.3 or less, it is excluded from the selection index.
Strong correlation	<ul style="list-style-type: none"> ● Compensation problem caused by double calculation ☞ Average indicators with a correlation coefficient of 0.8 or higher and replace them with new indicators
S_i	<ul style="list-style-type: none"> ● Even if the correlation coefficient is 0.3 or less, if the value has a certain effect, it is included in the count.

로운 지표(대용 지표)로 대체한 후 집계에 포함한다. 상관계수 값이 0.3 이하 또는 음(-)의 값을 가지는 경우, 지표가 종합 지수에 미치는 영향이 낮더라도 지표 자체의 특성을 무시할 수 없으며 이러한 특성을 비대체성(non-substitution)이라 부른다(OECD 2008). 비선형 상관비 S_i 는 각 지표가 지수에 갖는 영향력(기여율)을 분석하는 것으로 상관계수 값이 0.3 이하라도 S_i 값은 유의미한 값을 가질 수 있다. 즉, 지표가 갖는 비대체성의 특성을 고려하여 지표를 선정하여야 한다. 따라서 S_i 값이 양(+)일 경우 해당 지표는 집계에 포함하고 음(-)일 경우, 지표는 집계에서 제외한다. 상관계수 및 비선형 상관비 S_i 를 이용한 지표 선정기준은 Table 4와 같다.

III. 결과 및 고찰

1. 대표 지표 선정결과

생태적 건전성 지수의 지표 선정결과, 수량 부문은 낮은 역이미지(MSA) 상관관계를 갖는 고유량(HF) 0.348, 계절성(SP) 0.271 지표를 제외하고 모든 기준을 만족하는 저유량(LF), 영유량(ZF), 변동성(CV) 지표는 최종 지표로 선정하였다. 수질 부문은 높은 상관관계를 갖는 BOD(0.908), TP(0.817), 총대장균군

수(0.811) 지표를 제외하기보다는 지표 값들을 평균하여 “유기물(Organic mater: OM)”이라는 대용 지표로 대체하였다. 수질 부문에 대한 S_i 분석결과, 유기물, 클로로필-a, 목표수질 만족도(T-BOD, T-TP) 지표 중에서 유기물이 수질 부문에 미치는 기여율은 약 26.3%로 분석되어 최종 지표로 선정하였다. 수생태 부문의 부착돌말류, 저서성 대형무척추동물, 어류 지표는 모든 기준을 만족하였으며 서식·수변 부문의 서식및수변환경 지표도 최종 집계에 포함하였다(Table 5).

물 복지 지수의 지표 선정결과, 물공급 부문의 우수율(RWR), 용수이용계(DIW), 물수급률(WBR), 물이용 부문의 1인1일물사용량(LPCD), 대체수자원량(AWR), 상수도 보급률(WSR), 하수도 보급률(PSP) 지표는 1, 2차 기준을 모두 만족시키는 것으로 나타나 부문별 대표 지표로 선정하였다. 물서비스 부문의 상수도 운영자립도(SSR)는 낮은 역이미지 상관계수(0.205)를 갖는 것으로 나타나 대표 지표에서 제외하였다. 물서비스 만족도(CSS)는 수도요금 현실화율(RWC) 및 하수도 운영자립도(WSR) 지표와 상관계수가 각각 -0.396, -0.487 및 S_i 값은 0.109, 기여율 9.8%로 낮은 것으로 나타나 지표 선정에서 제외하였다. 따라서 물서비스 부문은 수도요금 현실화율 및

Table 5. Analysis results before and after selection of ecological indicators

Dimension	Indicator	Selection	Description
Water quantity	HF	×	- Low MSA(0.348), -. Excluded in the aggregation
	LF	○	- Satisfy all criteria - Included in the aggregation
	ZF	○	
	CV	○	
	SP	×	- Low MSA(0.271), -. Excluded in the aggregation
Water quality	BOD	○ (OM)	- High correlation: BOD(0.908), TP(0.817), TC(0.811) - Aggregate BOD, TP, TC into a sub-index - S_i value: 0.8100, contribution rate: 26.3%
	TP		
	TC		
	Chl-a	○	- Satisfy all criteria - Included in the aggregation
	T-BOD	○	
	T-TP	○	
Aquatic ecosystem	TDI	○	- Satisfy all criteria - Included in the aggregation
	BMI	○	
	FAI	○	
Habitat-riparian environment	HRI	○	- Included in the aggregation

Table 6. Analysis results before and after selection of social indicators

Dimension	Indicator	Selection	Description
Water supply	RWR	○	- Satisfy all criteria - Included in the aggregation
	DIW	○	
	WBR	○	
Water use	LPCD	○	- Satisfy all criteria - Included in the aggregation
	AWR	○	
	WSR	○	
	PSP	○	
Water service management	RWC	○	- Satisfy all criteria - Included in the aggregation
	WSR	○	
	CSS	×	- Low correlation: RWC(-0.3961), WSR(-0.4870) - S_i value: 0.1093(9.8%)
	SSR	×	- Low MSA(0.205) - Excluded in the aggregation
Water service equity	WSSE	○ (VWBR)	- High correlation: 0.980 - Aggregate WSSE, AWE into a sub-index - S_i value: 0.800, contribution rate: 55.1%
	AWE		
	WSSR	○ (VWS)	- High correlation: 0.930 - Aggregate WSSR, AWR into a sub-index - S_i value: 0.653, contribution rate: 44.9%
	AWR		

하수도 운영자립도를 대표 지표로 선정하였다. 물형평성 부문의 노령인구 물수급률(SWWE)과 기초생활 물수급률(AWE) 및 노령인구 물사용량(WSSR)과 기초생활 물사용량(AWR) 지표는 상관관계가 각각 0.980, 0.930으로 높은 상관관계로 분석되었다. 이들 지표는 집계 시 이중계산(double counting)의 문제가 있어 지표들의 평균값을 취하여 “취약계층 물수급률(VWBR)” 및 “취약계층 물사용량(VWS)”이라는 대응 지표로 조정하였다. 취약계층 물수급률 및 취약계층 물사용량의 값은 0.800, 0.653으로 물형평성 부문에 대한 기여 비율은 각각 55.1%와 44.9%로 분석되었다(Table 6).

2. 생태적 건전성 결과 분석

지표의 표준화 과정에서 절대 시간 변화를 살펴보기 위하여 기준년(2008년)에 따른 지표를 표준화하였다. 지수 값이 100 이상일 때 ‘ 좋음’, 100 이하일 때 ‘ 나쁨’으로 기준을 설정하여 지수를 평가하였다. 또한, 기준년에 따른 연도별 지수 값의 변화 차이(Diff)를 분석하였다.

1) 생태적 건전성 지수

생태적 건전성 지수의 중권역별 변화를 살펴보면, 용담댐(3001), 용담댐하류(3002), 무주남대천(3003), 영동천(3004), 초강(3005), 대청댐상류(3006), 보청천(3007), 대청댐(3008) 유역은 건전성 지수가 100 이상으로 ‘ 좋음’, 미호천(3011), 금강공주(3012), 논산천(3013), 금강하구연(3014) 유역은 건전성 지수가 ‘ 나쁨’ 상태를 나타냈다. 갑천(3009) 유역은 2013년 이후로 ‘ 좋음’ 상태로 나타났으며 대청댐하류(3010)는 2010년을 기준으로 급격히 건전성 지수가 ‘ 나쁨’으로 나타났다. 댐상류(대청댐 기준) 지역은 모든 지수 값이 100 이상으로 ‘ 좋음’ 상태였으나 댐하류 지역 대부분은 건전성 지수가 ‘ 나쁨’ 상태로 나타났다(Figure 2, Table 7).

기준년에 따른 연도별 건전성 지수의 변화를 살펴보면, 댐상류 지역인 용담댐, 용담댐하류, 보청천, 대청댐 유역은 건전성 지수가 ‘ 좋음’에도 불구하고 악화된 것으로 나타났으며 무주남대천, 영동천, 초강, 대청댐상류 유역은 다소간 차이는 있으나 개선된 상태를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 댐하류 지역의

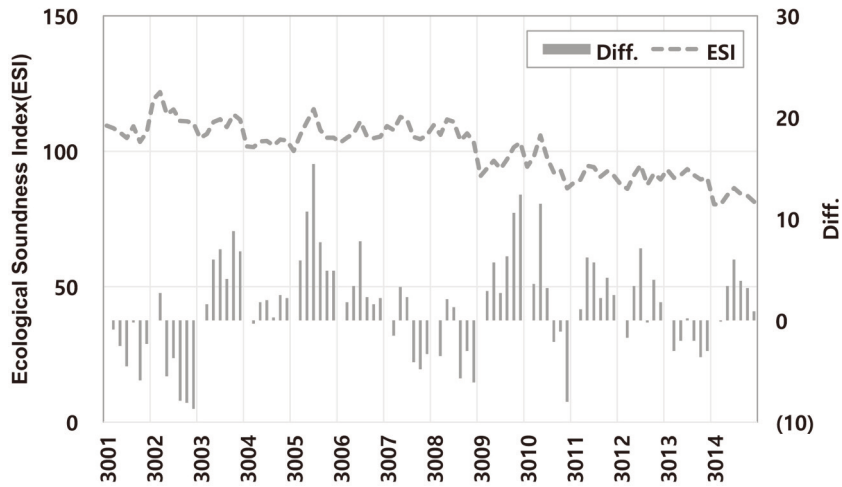


Figure 2. Trends in ecological soundness index by Geum River basin

Table 7. Results of ecological soundness index in Geum River basin

Sub-basin	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Yongdamdam	109.4	108.5	106.9	104.9	109.2	103.5	107.1
Yongdamdamharyu	119.1	121.8	113.6	115.4	111.2	111.0	110.4
Mujunamdaecheon	104.8	106.4	110.8	111.8	108.9	113.6	111.6
Yeongdongcheon	101.8	101.5	103.6	103.8	102.1	104.3	104.0
Chogang	100.1	106.0	110.8	115.5	107.8	105.0	105.0
Daecheongdamsangryu	103.2	105.0	106.6	111.0	105.5	104.8	105.4
Bocheongcheon	109.3	107.8	112.6	111.6	105.2	104.5	106.0
Daecheongdam	109.6	106.1	111.7	110.9	103.9	106.6	103.5
Gapcheon	90.8	93.7	96.5	93.5	97.1	101.4	103.2
Daecheongdamharyu	94.3	97.9	105.8	97.5	92.2	93.2	86.3
Mihocheon	88.4	89.5	94.6	94.1	90.6	92.6	90.9
Geumganggongju	87.8	86.1	91.2	94.9	87.6	91.8	89.6
Nonsancheon	93.2	90.2	91.2	93.4	91.2	89.6	90.2
Geumganghagueon	80.4	80.3	83.8	86.4	84.3	83.6	81.3

경우, 대청댐하류, 논산천은 건전성 지수가 ‘나쁨’에도 불구하고 더 악화한 것으로 나타났다. 반면 갑천, 미호천, 금강공주, 금강하구언은 개선되고 있는 것으로 나타났다(Figure 2).

2009년부터 2016년까지 국토해양부, 농림수산식품부, 환경부가 주관이 되어 홍수 조절 및 물 확보, 수질 개선 등을 위한 4대강 사업을 진행했다. 금강 유역은 본류, 미호천, 갑천, 유등천을 대상으로 보, 저수지 등의 지류 및 국가하천 정비사업을 2012년까지, 연계사업은 2016년까지 완료되도록 계획을 수립하였

다(Lee 2021). 환경부에서는 연계사업으로 수생태 복원 및 수질 개선 등의 목적으로 2009년부터 연차별로 대규모 예산을 배정하였다. 용담댐, 용담댐하류, 보청천 유역을 제외하고 나머지 유역에 대해서 생태하천 복원사업, 하수처리장의 신·증설 및 총인 시설의 고도화, 하수관거의 정비, 비점오염저감시설 설치 등의 사업을 진행하였다. 관련된 예산 현황을 살펴보면 Table 8과 같다(KSEE 2018).

예산이 집행된 대부분 유역은 시기별 차이는 있으나 2008년에 비해 개선된 것으로 나타났다. 반면, 대청댐,

Table 8. Budget status of the Geum River basin in the Four Major Rivers Restoration Project (Unit: KRW million)

Sub-basin	2009	2010	2011	2012	2013~2016
Yeongdong Stream	1,130	8,532	6,854	1,455	228
Yeongdong Stream, Cho River	0	0	597	0	0
Upper Daecheong dam	0	7	941	351	0
Daecheong dam	20,082	69,962	88,193	0	0
Gap Stream	33,912	38,970	47,617	18,545	85,129
Lower Daecheong Dam	469	3,571	9,851	6,833	3,069
Miho Stream	48,643	88,027	127,269	93,411	74,483
Geum River-Gongju	36,635	76,984	64,239	67,767	44,669
Nonsan Stream	39,882	21,821	21,269	22,032	31,949
Geum River estuary dam	9,911	35,361	18,639	21,598	13,238

대청댐하류 유역은 예산이 투입되었음에도 2008년도에 비해 건전성 지수가 오히려 크게 악화한 것으로 나타났다. 논산천 유역도 상대적으로 큰 예산이 투입되었으나 건전성 지수는 다소 감소한 것으로 나타났다.

2) 인구 변화에 따른 생태적 건전성 지수

생태적 건전성 관점에서 인구의 증가는 도시의 확장을 의미하며 불투수 면적 및 오염원의 증가를 유발한다. 이는 건강한 생태계 시스템의 가치 하락을 의미한다. 이러한 관점에서 시기별 인구 변화(3년 간격)에 따른 생태적 건전성 지수의 변화를 검토하였다. 댐상류 지역의 경우, 중권역 인구 변화는 대청댐 유역을 제외하고 큰 변화가 없었다. 대청댐 유역은 2008

년 104,052명, 2011년 102,489명, 2014년 120,625명으로 댐상류 지역 중 인구 변화가 가장 컸다. 이 시기의 건전성 지수는 인구가 급격히 증가한 시기(20011년에서 2014년)에 상대적으로 악화한 것으로 나타났다. 용담댐하류 유역의 경우 인구 변화가 거의 없음에도 불구하고 건전성 지수는 악화한 것으로 나타났다(Figure 3).

댐하류 유역의 경우, 갑천, 미호천, 금강공주 유역이 인구 변화가 큰 것으로 분석되었다. 2008년을 기준으로 갑천 유역은 2011년 34,795명, 2014년 60,621명, 미호천 유역은 2011년 50,907명, 2014년 77,758명이 증가하였다. 금강공주 유역은 2011년 1,921명 감소, 2014년 30,317명이 증가하였다. 건전성 지수를 살펴

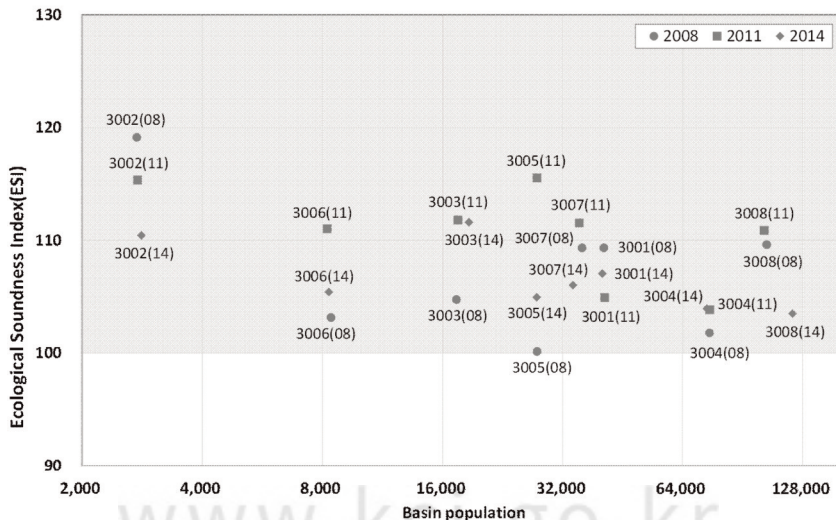


Figure 3. ESI changes by population size (Upstream basin)

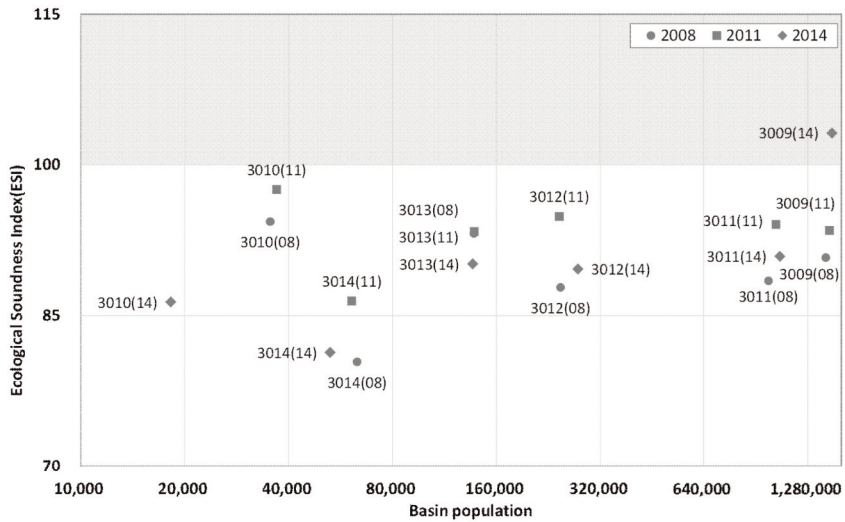


Figure 4. ESI changes by population size (Downstream basin)

본 결과, 미호천, 금강공주 유역은 2008년을 기준으로 건전성 지수가 전체적으로 개선되었으며 2011년 이후 건전성 지수는 상대적으로 악화한 것으로 나타났다. 갑천 유역은 건전성 지수가 지속해서 개선된 것으로 분석되었다. 미호천 및 금강공주 유역은 충북 오송, 세종시 등 지속적인 개발사업에 따라 건전성 지수가 악화한 것으로 분석되며 이에 반해 갑천 유역은 하수처리장 개선 및 비점오염원 저감시설 등 점·비점 오염에 대한 지속적인 투자로 건전성 지수가 개선된 것으로 판단된다(Figure 4).

3. 물 복지 결과 분석

1) 물 복지 지수

물 복지 지수는 무주남대천, 갑천, 대청댐하류, 미호천, 논산천 유역이 ' 좋음'으로 나타났다. 특히, 도시 규모가 큰 갑천, 미호천 유역이 물 복지 수준이 가장 높은 것으로 나타났다. 용담댐, 용담댐하류, 초강, 대청댐상류 유역은 '나쁨'으로 나타났다. 전체적으로 일부 유역(무주남대천, 영동천)을 제외하고 대청댐상류 지역보다 대청댐하류 지역, 도시화가 진행된 지역일

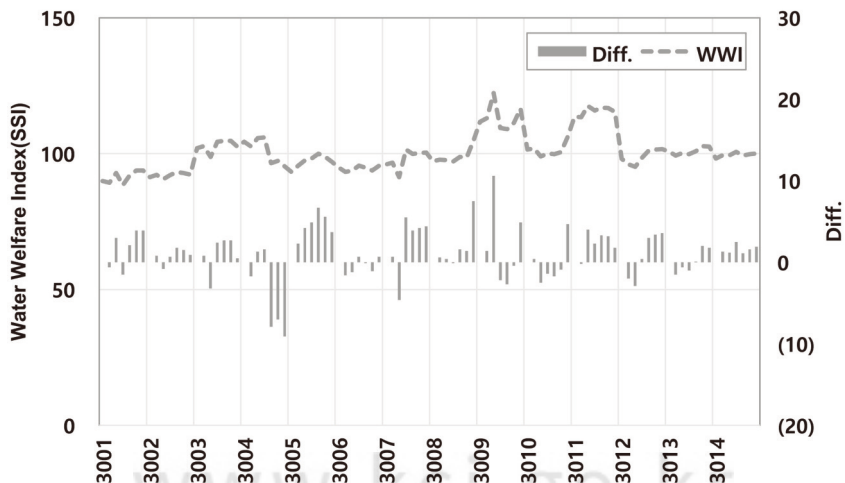


Figure 5. Trends in water welfare index by Geum River basin

Table 9. Results of water welfare index in Geum River basin

Sub-basin	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Yongdamdam	89.9	89.3	92.9	88.4	92.0	93.8	93.8
Yongdamdamharyu	91.4	92.2	90.6	92.1	93.2	92.9	92.3
Mujunamdaecheon	102.0	102.8	98.8	104.4	104.7	104.7	102.5
Yeongdongcheon	104.4	102.7	105.7	106.0	96.5	97.4	95.3
Chogang	93.3	95.6	97.5	98.2	100.0	98.9	97.0
Daecheongdamsangryu	94.9	93.3	93.7	95.6	94.8	93.8	95.6
Bocheongcheon	96.0	96.7	91.4	101.5	99.9	100.2	100.4
Daecheongdam	97.2	97.8	97.6	97.1	98.8	98.6	104.7
Gapcheon	111.7	113.1	122.3	109.5	109.0	111.3	116.6
Daecheongdamharuy	101.5	101.9	99.0	100.1	99.8	100.6	106.2
Mihocheon	113.6	113.4	117.6	115.9	116.9	116.8	115.4
Geumganggongju	98.1	96.1	95.2	98.5	101.1	101.5	101.7
Nonsancheon	100.8	99.3	100.2	99.8	100.9	102.8	102.6
Geumganghagueon	98.2	99.5	99.4	100.7	99.3	99.8	100.1

수록 물 복지 수준이 양호하였다(Figure 5, Table 9).

2008년을 기준으로 시계열 변화를 살펴보면, 다소 간 차이는 있으나 물 복지가 개선된 유역은 용담댐, 용담댐하류, 무주남대천, 초강, 보청천, 대청댐, 미호천, 금강공주, 금강하구언 유역이며 특히, 초강, 보청천 유역이 상대적으로 크게 개선되었다. 반면, 영동천 유역은 2012년부터 물 복지 지수가 상대적으로 크게 악화한 것으로 나타났다. 이는 기초자료인 물수급률의 물공급량(지방정수장시설용량+광역상수도배분

계획량) 자료가 2012년부터 급감한 것이 주요인으로 나타났다(Figure 5).

2) 인구 변화에 따른 물 복지 지수

대청댐 유역은 댐상류 지역 중 2008년을 기준으로 약 16,573명(2014년)의 인구가 증가하였으며 나머지 유역은 증감이 있으나 큰 변화는 없는 것으로 나타났다. 대청댐 유역은 인구가 증가한 시기에 물 복지가 개선된 것으로 나타나고 있다. 반면 나머지 유역은 인구

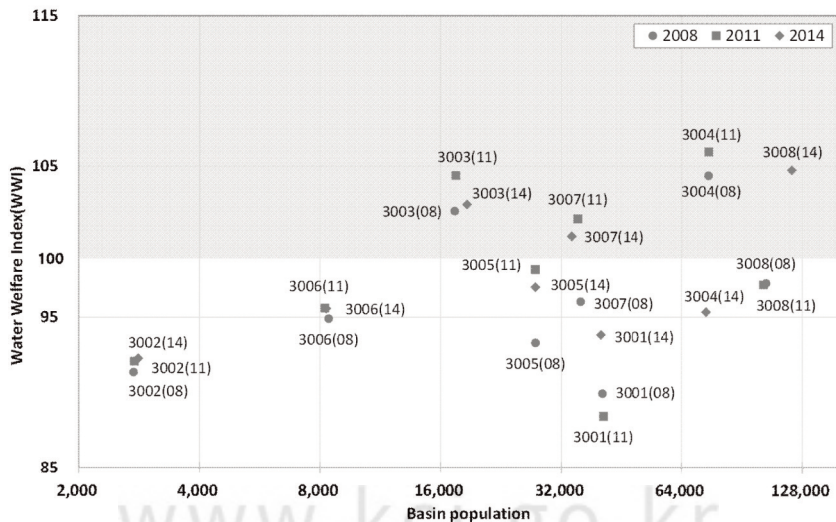


Figure 6. WWI changes by population size (Upstream basin)

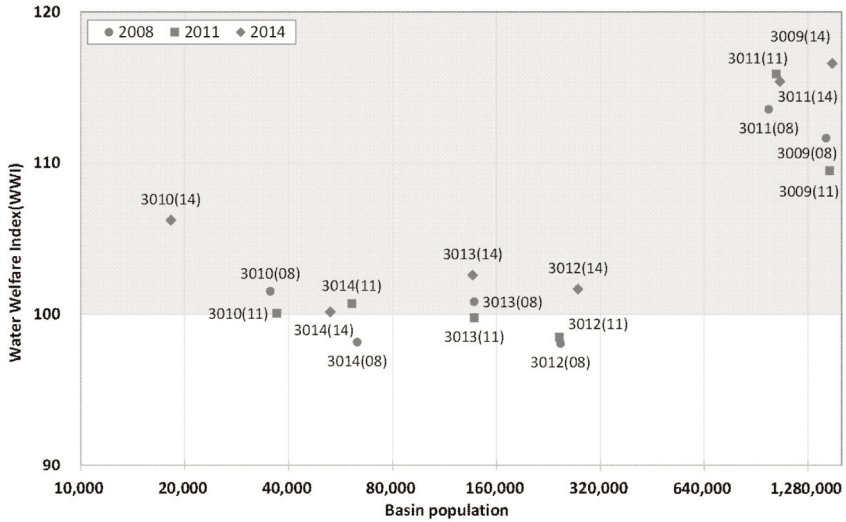


Figure 7. WWI changes by population size (Downstream basin)

규모의 증감 폭이 크지 않았으며 물 복지 지수는 유역 특성에 따라 다양하게 나타났다. 댐하류 지역은 금강 수계에서 인구 규모가 가장 큰 미호천, 갑천 유역이 '매우 좋음' 상태로 다른 유역보다 상대적으로 물 복지 수준이 높게 나타났다. 대청댐하류 유역의 경우 인구가 약 17,132명(2014)이 감소하였을 때 물 복지가 개선된 것으로 나타났다. 유역에 따라 다소 차이는 있으나 대도시보다는 소도시 또는 농촌 지역이 물 복지 수준이 낮은 것으로 나타났다. 이는 물 서비스의 제공

수준 및 인프라 시설의 투자가 상대적으로 대도시보다 낮은 것이 주요인으로 파악되었다(Figure 6~7).

4. 하천 종합건전성 결과 분석

하천의 생태계 서비스 측면에서 생태적 건전성과 인간의 물 이용에 대한 사회적 서비스 즉, 물 복지는 물의 이용 주체 측면에서 서로 이질적인 특성을 갖는다. 따라서 두 서비스 간의 종합적인 상태를 평가하기 위해 4분면 모형을 이용하여 하천 종합건전성을 분석하였다.

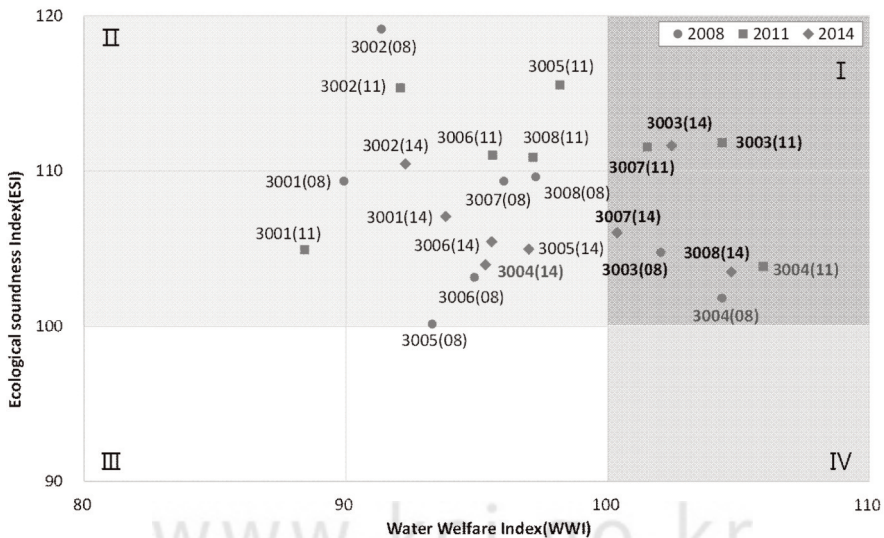


Figure 8. ESI vs WWI comparison (Upstream basin)

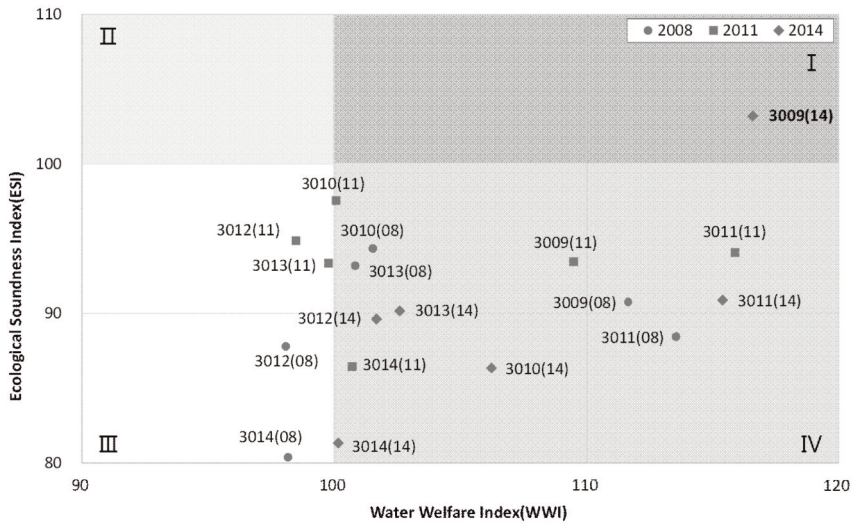


Figure 9. ESI vs WWI comparison (Downstream basin)

금강수계 중권역의 하천 종합건전성을 살펴보면, 댐상류 지역은 생태적 건전성이 모두 좋은 상태를 유지하고 있으나 물 복지 수준은 일부 유역을 제외하고 나쁜 상태로 나타났다. 댐하류 지역은 일부 유역을 제외하고 물 복지 수준이 좋은 상태를 유지하고 있으나 생태적 건전성은 좋지 않은 것으로 나타나고 있다.

세부적으로 살펴보면 댐상류 지역은 생태적 건전성 지수가 100 이상으로 모두 ‘ 좋음’으로 나타났다. 반면, 물 복지는 수준에 따라 다양하게 분포하고 있다. 무주 남대천(3003), 보청천(3007), 대청댐(3008) 유역은 1사분면으로 생태적 건전성 및 물 복지가 2008년 이후 잘 유지되고 있는 것으로 나타났다. 영동천(3004)의 경우 2011년까지 1사분면에 있었으나 2012년 이후로는 2사분면에 위치해 급격한 변화를 나타내었다. 이는 전술한 바와 같이 기초자료인 물수급률이 2012년부터 급격히 악화한 것이 주요한 원인이다(Figure 8).

댐하류 지역의 경우 2014년 갑천(3009) 유역만이 생태적 건전성과 물 복지가 모두 ‘ 좋음’으로 나타났다. 갑천 유역은 인구가 증가하였음에도 생태하천 복원사업, 하수처리장 및 하수관거, 비점오염원 저감시설 등에 대한 지속적인 투자와 물 관련 서비스의 질적 향상을 통하여 로 하천 종합건전성이 크게 개선된 것으로 나타났다. 금강공주(3012) 유역은 2008년, 2011년, 논산천(3013) 유역은 2011년, 금강하구연(3014) 유역

은 2008년 3사분면에 위치해 생태적 건전성과 물 복지가 모두 ‘ 나쁨’으로 나타났다. 그러나 이들 유역은 점진적으로 지수가 개선되고 있는 것으로 나타났다. 나머지 유역은 생태적 건전성이 좋지 않음에도 물 복지는 좋은 것으로 나타나 생태적 건전성에 대한 세밀한 원인 분석 및 지속적인 모니터링을 통한 개선이 필요할 것으로 판단된다(Figure 9).

IV. 결론 및 제언

본 연구에서는 물 이용의 관점에서 하천 생태계의 건강성 및 인간의 물 이용에 대한 사회적 서비스의 수준을 분석하기 위해 하천 건전성 및 물 복지에 대한 지수를 산정하여 금강수계 유역의 하천 종합건전성을 평가하였다. 상세한 분석을 위하여 기준년(2008년)을 설정하여 지표를 표준화하였으며 사업집행 금액, 인구 변화 등의 추가 자료 분석을 통해 유역별 하천 건전성을 4분면 모형을 이용하여 종합 분석하였다.

생태적 건전성은 댐상류(대청댐 기준) 지역이 모두 ‘ 좋음’으로 나타났으나 기준년에 따른 변화 추이를 살펴보면, 용담댐, 용담댐하류, 보청천, 대청댐 유역은 건전성 지수가 감소하였다. 댐하류 지역의 중권역은 대부분 생태적 건전성이 악화하였으며 대청댐하류 및 논산천 유역은 하천환경 개선을 위한 지속적인 투자

에도 불구하고 개선되지 않았다. 다만, 갑천 유역은 하천환경 개선을 위한 지속적인 투자로 기준년 이후로 건전성 지수가 ' 좋음(2014년)'으로 나타났다. 인구 규모에 따른 지수 변화는 댐상류 지역의 경우, 모든 증권역이 ' 좋음'으로 나타났으며 댐하류 지역은 2014년 갑천 유역을 제외하고 모두 ' 나쁨'으로 나타나 대청댐을 기준으로 상·하류 유역 간 지수의 차이가 크게 나타났다. 댐하류 지역의 경우, 인구 규모 및 상류 유역에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다.

물 복지는 기준 지수(100)에 근접하거나 상위에 있으며 시간에 따른 변화 폭도 생태적 건전성과 비교하여 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 따라서 물의 사회적 서비스 수준은 전반적으로 관리가 양호한 것으로 평가할 수 있다. 댐상류 지역보다는 댐하류 지역의 물 복지 수준이 높았으며 영동천을 제외한 나머지 유역이 점진적으로 개선된 것으로 나타났다. 인구 규모가 큰 미호천, 갑천 유역을 제외하고 인구의 규모나 변화에 따른 지수 변화보다는 지역적 특성에 따라 물 복지 수준이 다양하게 나타났다.

하천 종합건전성을 평가한 결과, 댐상류 지역은 1, 2사분면, 댐하류 지역은 갑천(2014) 유역을 제외하고 3, 4사분면에 위치해 대청댐을 기준으로 대조적인 분포양상이 나타났다. 생태적 건전성 및 물 복지가 모두 양호한 유역(1사분면)은 무주남대천, 보청천, 대청댐 유역이었다. 금강공주, 논산천, 금강하구연 유역은 초기에는 비교적 양호하지 못한 상태(3사분면)였으나 점차 물 복지 지수가 개선되는 상태(4사분면)로 나타났다. 갑천 유역은 금강수계에서 도시 및 인구 규모가 가장 큰 유역임에도 불구하고 점진적으로 개선되어 2014년 하천 종합건전성이 모두 ' 좋음'으로 나타나 유역관리에 많은 시사점을 제시하고 있다. 따라서 갑천 유역의 하천 생태계 및 물 서비스 관리에 대한 체계적인 관리 및 대책 수립 과정을 자세히 검토하여 타 유역에 대한 적극적인 활용방안을 모색해야 할 것이다.

사사

이 논문은 2020학년도 충북대학교 연구년제 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- ANZECC. 2000. Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality (Vol. 1, Australian and New Zealand Environment and Conservation Council (ANZECC) and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand (ARMCANZ)). Canberra Environment Australia.
- Becker W, Paruolo P, Saisana M, Satelli A. 2015. Weights and importance in composite indicators: mind the cap. Springer international publishing switzerland. Handbook of uncertainty quantification. pp. 1187-1216.
- Becker W, Saisana M, Paruolo P, Vandecasteele I. 2017. Weights and importance in composite indicators: closing the gap. Ecological indicators. 80: 12-22.
- Chang HJ, Bonnette MR. 2016. Climate change and water-related ecosystem services: impacts of drought in California, USA. Ecosystem Health and Sustainability. 2(12): 1-19.
- Choi CH, Kim YS, Kim JS, Kim DH, Kim JW, Kim HS. 2018. Indicator development and evaluation of storm and flood resilience using big data analysis. J. Korean Soc. Hazard Mitig. 18(4): 109-123. [Korean Literature]
- Choi HJ, Jo YJ, Kim HY, An YM, Jang JH. 2020. Development of national water welfare index and future tasks to realize inclusive water welfare policy. Journal of Water Policy & Economy 34: 63-72. [Korean Literature]
- Greco S, Ishzaka A, Tasiou M, Torrisi G. 2019. On the methodological framework of composite indices: a reiew of the issues of weighting, aggregation, and robustness. Soc Indic Res. 141: 61-94.
- Kao C, Wu WY, Hsieh WJ, Wang TY, Lin C,

- Chen LH. 2008. Measuring the national competitiveness of Southeast Asian countries. *European Journal of Operational Research* 187(2): 613-628.
- Karr JR. 1999. Defining and measuring river health. *Freshwater Biology* 41: 221-234.
- Kim HM. 2020. Analyzing freshwater soundness considering ecological and social characteristics. Ph.D. Thesis. Graduate School of Chungbuk National University. [Korean Literature]
- Kim HM, Ha SR. 2021. Analyzing ecological soundness considering the implicit weight of the indicator. *J. Environ. Impact Assess.* 30(4): 258-269. [Korean Literature]
- Korea Environment Institute (KEI). 2014. A Study on the development and application of index for sustainable water use (I). [Korean Literature]
- Korea Environment Institute (KEI). 2017. Research on improvement of environmental standards for water quality and aquatic ecosystem. [Korean Literature]
- Korea Water Resources Corporation (KWRC). 2018. Study on the development a system for evaluating the health of the rivers comprehensively. KIWE-WSO-17-15. [Korean Literature]
- Korean Society of Environmental Engineers. 2018. Water quality evaluation and analysis of causes of water quality change in weir sections related to the Four Major Rivers Restoration Project. Volume 1 (Parts 1 and 2, Investigation and Evaluation of Water Quality before and after the Four Major Rivers Restoration Project). [Korean Literature]
- Lee JH. 2021. Reassessment on the Four Major Rivers Restoration Project and the Weirs Management. *J. Environ. Impact Assess.* 30(4): 225-236. [Korean Literature]
- Lee DK. 2021. Development of indicators for the evaluation of welfare in small and medium cities. MS degree. Graduate School of Kyungil University. [Korean Literature]
- Lee DK, Ahn SS, Park KB. 2021. Evaluation of the level of water welfare in 24 Local Governments in Deagu-Gyeongsangbukdo using statistical yearbook. *Journal of Environment Science International.* 30(11): 937-944. [Korean Literature]
- Mazziotta M, Pareto A. 2018. Measuring Well-Being Over Time: The adjusted Mazziotta-Pareto index versus other non-compensatory indices. *Social Indicators Research* 136: 967-976.
- Mazziotta M, Pareto A. 2016. On a generalized non-compensatory composite index for measuring socio-economic phenomena. *Social Indicators Research* 127: 983-1003.
- OECD. 2008. Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide. available at <https://www.oecd.org/sdd/42495745.pdf>.
- Saisana M, Saltelli A. 2011. Rankings and ratings: Instructions for use, *Hague Journal on the Rule of Law* 3: 247-268.
- Vollmer D, Shaad K, Souter NJ, Farrell T, Dudgeon D, Sullivan CA, Fauconnier I, MacDonal GM, McCartney MP, Power AG, McNally A, Andelman SJ, Capon T, Devineni N, Apirumanekul C, Nam NC, Shaw MR, Wang RY, Lai C, Wang Z, Regan HM. 2018. Integrating the social, hydrological and ecological dimensions of freshwater health: The Freshwater Health Index. *Science of the Total Environment* 627: 304-313.
- Vörösmarty CJ, McIntyre PB, Gessner MO, Dudgeon D, Prusevich A, Green P, Glidden S, Bunn SE, Sullivan CA, Kiermann CR, Davies PM. 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* 467: 555-561.