

# 유역 물순환 건전성 평가방법의 제안

이남주\*, 강태욱\*, 진영규\*\*, 이상호\*\*

\*경성대학교 토목공학과

\*\*부경대학교 지속가능공학부 토목공학전공

e-mail: njlee@ks.ac.kr

## A Proposal of Assessment Method for Soundness of Hydrologic Cycle in Watershed

Namjoo Lee\*, Taek Kang\*, Youngkyu Jin\*\*, Sangho Lee\*\*

\*Department of Civil Engineering, Kyungsoong University

\*\*Major of Civil Engineering, Pukyong National University

### 요약

최근의 지속적인 홍수와 가뭄 등에 의한 물 문제는 건전한 유역 물순환 관리에 관한 사회적 요구를 증대시키고 있다. 이 연구의 목적은 건전한 유역 물순환 관리를 위해 현재의 유역 물순환 상태를 평가하고, 개선사항을 도출하기 위한 방안을 제시하는데 있다. 유역의 물순환 관리를 효과적으로 수행하기 위해서는 유역 전반의 물 이동과 물 이용에 관한 정량적 평가가 선행되어야 한다. 또한, 유역의 물순환 건전성을 평가할 수 있는 지표와 기준이 필요하다. 이에 이 연구에서는 관측 및 모형을 통한 분석을 통해 유역의 수문 현상을 정량화하는 방안을 제시하였고, 유역의 물순환 건전성을 평가하기 위한 7가지의 지표와 기준을 제안하였다. 이 연구에서는 제안한 유역 물순환 건전성 평가 방법을 남강 중권역에 대하여 시범 적용하였고, 평가 결과를 제시하였다.

### 1. 서론

자연적, 인위적 요인에 의한 물순환 왜곡과 물순환 건전성 저하는 이수, 치수, 환경 등 다양한 물 관리 분야의 문제를 발생시키고 있다. 이에 따라 우리나라에서는 2021년에 ‘건전한 물순환 달성’을 목표로 제1차 국가물관리기본계획(관계부처합동, 2021)이 수립되었다. 이 연구는 제1차 물관리기본계획의 목표인 ‘건전한 물순환 달성’을 위해 선행되어야 할 유역의 물순환 건전성을 평가하여 진단하는 방법을 제안하는데 목적이 있다.

유역의 물순환 건전성을 평가하기 위해서는 유역의 자연적 수문 현상과 인위적 이용에 따른 물의 이동을 정량적으로 분석할 수 있어야 한다. 또한, 유역의 물순환 건전성을 진단할 수 있는 지표와 기준이 필요하다. 이에 이 연구에서는 관측 또는 모형을 이용한 분석 결과를 이용하여 유역의 물순환을 정량화하는 방안을 제시하였다. 그리고 우리나라의 물 관련 정책 및 제도와 선행 연구에 대한 조사를 통해 물환경, 물이용, 물안전의 3가지 범주에 대하여 7가지의 평가지표와 기준을 제시하였다.

### 2. 유역의 물순환 건전성 평가 방법

#### 2.1 유역의 물순환 정량화

유역의 물순환 정량화 요소는 크게 자연계와 인공계 물순환 요소로 구분할 수 있다. 자연계 물순환 요소는 강수량, 증발산량, 표면·중간·기저 유출량, 침투량, 침투량 등이 포함된다. 인공계 물순환 요소는 인간의 활동에 의해 발생하는 농업용수 공급·회귀 수량, 생·공용수 취수량, 하(폐)수 방류량, 지하수 양수량 등이 해당된다. 유역의 물순환 정량화는 이러한 자연계 물순환 요소와 인공계 물순환 요소를 모두 고려한 유역 내 물순환의 전 과정을 수량화하여 제시하는 것이다.

한편, 물순환 구성 요소에는 강수량, 생·공용수 취수량, 저수지 저수량, 지하수 양수량, 하수처리 방류 수량 등 계측이 되는 요소와 유역 유출량, 침투량, 증발산량, 농업용수 공급·회귀 수량 등의 미계측 요소로 구분된다. 물순환 정량화에서 미계측 물순환 요소의 정량화는 유역 유출 모형, 저수지 모의 운영 모형에 의한 추정이 필요하다. 이때 모형은 하천 취수 및 방류, 지하수 양수 및 함양 등 다양한 인공계 물순환 요소들을 고려할 수 있어야 한다. 특히, 우리나라 대부분의 유역에는 크고 작은 규모의 농업용 저수지가 포함되어 있으며, 농업용 저수지의 관리 주체인 ‘농어촌공사’에서는 농업용 저수지의 저수율만 계측하고 있으므로 농업용수의 공급 및 회귀 수량은 적절한 방법으로 추정될 필요가 있다. 따라서 물순환 정량화는 모형에 의한 미계측 물순환 요소의 추정이 필요하므로, 신뢰할 수 있는 수준의 모형 보정이 필요하다.

#### 2.2 물순환 건전성 평가지표

이 연구에서는 국가물관리기본계획, 제2차 물환경관리 기본계획 등의 물관리 대상을 고려하여 물순환 건전성 평가 대상을 물환경, 물이용, 물안전의 3가지 범주로 구분하였다. 각각의 범주에는 유역의 물순환 건전성을 평가할 목표 대상인 평가 항목이 2개 이상 포함되어 있다. 구체적으로 물환경 범주 내에는 수질 관리, 비점오염 관리, 수생태 관리의 3가지 항목이 포함된다. 그리고 물이용의 범주는 하천유지기능, 지하수 보전 항목을 포함하고, 물안전의 범주에는 치수 관리 및 이수 관리 항목이 각각 포함된다(표 1).

한편, 각각의 평가 항목에 대한 건전성 평가는 평가지표를 통해 분석된다. 이에 따라 이 연구에서는 7가지의 평가 대상 항목에 대하여 한 개 이상의 평가지표를 포함하도록 구성하였다(표 1). 각각의 물순환 건전성 평가지표는 유역에서 발생될 수 있는 물순환의 문제점을 파악할 수 있는 지표로서 선정되었다. 특히, 수질 관리 항목, 비점오염 관리 항목, 수생태 관리 항목, 하천유지기능 항목에 포함된 각각의 지표는 현재의 법과 제도에 근거한 요소로서 의미가 있다.

[표 1] 물순환 건전성 평가 항목별 평가지표 및 선정 근거

범주	항목	평가지표	자료 기반	선정 근거
물환경	수질 관리	하천 생활환경 지표 (BOT, TP)	관측 모의	물환경보전법 제10조의2, 중권역별 수질 및 수생태계 목표기준
	비점오염 관리	비점오염 관리 강우량	모의	물환경보전법 제53조의5, 비점오염관리를 위한 물순환관리지표 산정지침
	수생태 관리	5가지의 수생태 평가지표	관측	물환경보전법 제9조의3, 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가 방법 등에 관한 지침
물이용	하천유지기능	하천유지유량	관측 모의	하천법 제51조 제1항에 따른 하천별 고시
	지하수 보전	지하수 개발률	관측	지하수 개발 한계 고려
물안전	치수 관리	제방 정비율	관측	하천유역수자원관리계획 수립지침의 하천 범람 대비 안전율
	이수 관리	급수 제한율	관측	관측 기반의 물공급 안전 고려

### 2.3 물순환 건전성 평가체계

유역의 물순환 건전성 평가는 표준유역 단위로 홍수와 가뭄이 모두 포함된 기간의 자료(예, 최근 10년)를 이용하여 분석하고, 중권역의 물순환 개선 사업 수립을 목적으로 한다.

이에 따라 물순환 건전성 평가는 중권역에 존재하는 각각의 표준유역에 대하여 수행하여 중권역의 물순환 문제점을 파악한다. 그리고 중권역의 물순환 문제점을 개선하기 위한 표준유역간 물순환 건전화 사업의 우선순위를 결정한다. 이를 위해 등급화된 개별 평가지표에 대하여 표준유역별 달성 등급을 평가하고, 표준유역간의 상대적 건전성을 분석하여

물순환 건전화 사업의 우선순위를 결정한다. 이를 통해 우선 순위가 높은 표준유역부터 물순환 개선 사업을 순차적으로 수립한다. 그림 1은 이 연구에서 제안한 유역의 물순환 건전성 평가체계이다.

물순환 건전성 평가체계(최종)



[그림 1] 물순환 건전성 평가체계

### 2.4 물순환 건전성 평가 기준

유역간 물순환 건전화 사업의 우선순위 결정에서는 평가 항목별 등급화가 중요하다. 평가 항목의 등급은 표준유역의 달성 점수를 기반으로 구분되는데, 달성된 점수의 범위와 분포를 고려하여 결정되어야 한다. 이 연구에서는 선행 연구(K-water, 2022)를 통해 유역간 물순환 건전화 사업의 우선순위 평가 등급의 기준을 제시하였다(표 2).

표준유역간 물순환 건전화 사업의 우선순위 결정을 위해서는 표준유역간 물순환 건전성에 대한 상대적 비교가 필요하다. 이에 이 연구에서는 7개의 평가지표를 종합한 유역의 물순환 건전성 지수(hydrologic soundness index; HSI)를 도입하였다(식 (1)).

$$HSI = \sum a_i \times GS_i \quad (1)$$

여기서,  $HSI$ 는 평가 대상 표준유역의 물순환 건전성 지수,  $i$ 는 각각의 평가지표를 의미하고,  $a_i$ 는  $i$  평가지표의 가중치,  $GS_i$ 는 평가대상 유역의  $i$  평가지표에 대한 달성 등급에 따른 점수(grade score)이다.

표 2는 7개의 평가지표에 대한 등급 구분과 전문가 설문조사를 통해 결정된 각 평가지표의 가중치를 나타낸다. 평가지표별 달성 등급에 따라 점수(1~7점)가 차등 부여되는데, I 등급인 경우 7점을 부여하고, VII 등급인 경우에는 1점을 부여한다.

한편, 표준유역간 물순환 건전화 사업의 우선순위 평가는 표준유역별로 산정된 물순환 건전성 지수의 크기 비교를 통해 수행되는데, 물순환 건전성 지수가 높을수록 유역의 물순환이 건전함을 의미한다.

[표 2] 평가 항목별 등급화 기준

평가 항목	수질 관리	비점오염 관리	수생태 관리	하천 유지 기능	지하수 보전	치수 관리	이수 관리
가중치	0.1257	0.1035	0.1087	0.2030	0.1101	0.1597	0.1893
등급	하천 수질 등급 (BOD, TP)	25.4 mm 중 초과우량 (mm)	수생태 지수	하천유지 유량 달성 비율(%)	지하수 개발률 (%)	제방 정비율 (%)	급수 제한율 (%)
I	매우 좋음	0	0.85 이상	95% 이상	10% 이하	85% 이상	0
II	좋음	0.4 mm 이하	0.70 이상	85% 이상	25% 이하	70% 이상	0.1% 이하
III	약간 좋음	0.8 mm 이하	0.55 이상	75% 이상	40% 이하	55% 이상	0.2% 이하
IV	보통	1.2 mm 이하	0.40 이상	65% 이상	55% 이하	40% 이상	0.3% 이하
V	약간 나쁨	1.6 mm 이하	0.25 이상	55% 이상	70% 이하	25% 이상	0.4% 이하
VI	나쁨	2.0 mm 이하	0.10 이상	45% 이상	85% 이하	10% 이상	0.5% 이하
VII	매우 나쁨	2.0 mm 초과	0.10 미만	45% 미만	85% 초과	10% 미만	0.5% 초과

3. 남강 중권역에 대한 시범 적용

3.1 물순환 건전성 관리 목표 설정

유역의 물순환 건전성 평가는 현재의 유역 물순환 상태를 진단하여 문제점을 파악하고, 유역에 필요한 물순환 개선 사업을 통해 유역의 물순환 건전화를 달성하는데 목적이 있다. 따라서 물순환 건전성 관리의 목표는 물순환 건전성 평가에 활용된 평가 기준을 통해 설정되는 것이 바람직하다. 한편, 유역마다 물순환의 문제점이 상이할 수 있으므로 물순환 건전성의 관리 목표는 유역의 물순환을 대표하는 하나의 지표로서 정의되는 것보다 각각의 요소에 대한 목표 설정을 통해 정립되는 것이 적절하다. 이에 이 연구에서는 물순환 건전성 관리 목표를 이 연구에서 설정한 7개의 물순환 건전성 평가 항목에 대하여 정의하였다. 이 연구에서는 물순환 건전성 평가의 관리 목표를 건전성 항목별로 VII 등급 중 IV 등급(보통) 이상인 상태로 설정하였다.

그림 2는 이 연구에서 설정한 남강 중권역에 대한 7가지 항목별 물순환 건전성 관리 목표를 나타낸다. 중권역별로 물순환 건전화의 관심 대상과 정도는 다를 수 있다. 이에 물순환 건전성 관리 목표는 중권역별로 상이하게 구성될 수 있다. 또한, 유역의 물순환 상태는 자연적 또는 인위적 영향(개발 행위, 개선사업 등)으로 변할 수 있다. 따라서 물순환 건전성 관리 목표는 현재의 물순환 상태를 반영하여 가변적으로 설정하는 것이 적절하다.

물순환 건전성 관리 목표

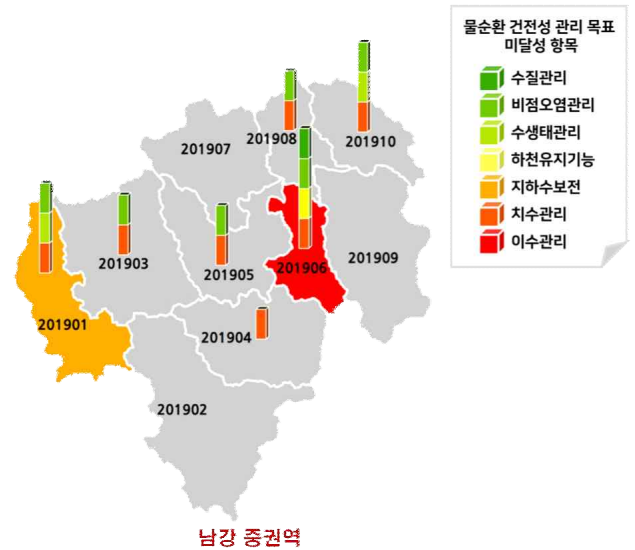


항목	관리 목표 기준	
수질 관리	하천 수질 등급 (BOD, TP)	보통 이상
비점오염 관리	비점오염 관리 목표강우량 (25.4 mm) 중 초과우량(mm)	1.2 mm 이하
수생태 관리	수생태 지수	0.40 이상
하천유지 기능	하천유지유량 달성 비율(%)	65% 이상
지하수 보전	지하수 개발률(%)	55% 이하
치수 관리	제방 정비율(%)	40% 이상
이수 관리	급수 제한율(%)	0.3% 이하

[그림 2] 물순환 건전성 관리 목표

3.2 물순환 건전성 관리 목표의 달성 검토

남강 중권역에 대하여 물순환 건전성 관리 목표의 달성 여부를 검토하였다. 그림 3은 남강 중권역에 포함된 10개 표준유역에 대한 평가 항목별 물순환 건전성 관리 목표의 달성 여부를 분석한 결과이다. 물순환 건전성 관리 목표의 달성 정도는 표준유역에 따라 상이하게 나타났는데, 모든 항목을 만족하는 표준유역은 3곳(201902, 201907, 201909 표준유역)으로 분석되었다.



[그림 3] 남강 중권역의 물순환 건전성 관리 목표 달성 검토

3.3 물순환 건전성 지수 산정

표 2의 평가 항목별 등급과 가중치를 이용하여 남강 중권역의 표준유역별 물순환 건전성 지수(HSI)를 표 3과 같이 산정하였다. 분석된 물순환 건전성 지수는 7점 척도이고, 수치가 높을수록 건전함을 의미한다. 즉, 남강 중권역에서는 201902 표준유역의 물순환 건전성 지수가 5.87로 가장 높기 때문에 가장 건전한 물순환 상태인 것으로 판단할 수 있다. 반면에, 201906 표준유역의 물순환 건전성 지수(4.43)는 가장 낮아 물순환 상태가 가장 나쁘므로 물순환 건전화 사업의 우선순위가 가장 높은 표준유역으로 선정되었다.

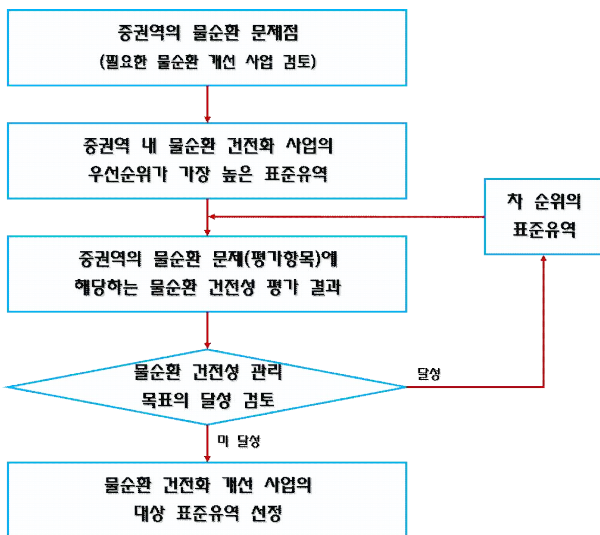
[표 3] 중권역별 물순환 건전화 사업의 우선순위 결정

표준 유역 번호	물환경			물이용		물안전		물순환 건전성 지수	물순환 건전화 사업의 우선순위
	수질 관리	비점오염 관리	수생태 관리	하천유지 기능	지하수 보전	치수 관리	이수 관리		
201901	II	VII	V	II	IV	VI	I	4.49	2
201902	II	II	II	II	II	IV	I	5.87	10
201903	II	VII	IV	I	III	V	I	5.07	5
201904	II	III	IV	II	II	VI	I	5.23	4
201905	II	VI	III	II	III	V	I	5.08	7
201906	IV	V	III	V	II	V	I	4.43	1
201907	III	III	IV	II	III	IV	I	5.31	9
201908	III	VI	III	I	II	VII	I	4.95	6
201909	III	IV	II	IV	II	IV	I	5.13	8
201910	III	V	VI	I	III	VII	I	4.61	3

3.4 물순환 문제점 분석 및 물순환 개선 사업 대상 선정

중권역의 물순환 문제를 해소하기 위한 개선 사업은 표준유역 단위에서 이행된다. 다만, 해당 표준유역이 중권역의 물순환 문제를 해소하기 위한 적절한 표준유역인지에 대한 검토가 필요하다. 이 연구에서는 물순환 건전화 개선 사업의 대상 표준유역 선정에 관한 절차를 그림 4와 같이 제시하였다.

우선, ① 중권역의 물순환 문제점을 파악하여 요구되는 물순환 개선 사업을 검토한다. ② 물순환 건전성 평가를 통해 분석된 물순환 건전화 사업의 우선순위가 가장 높은 표준유역을 선택한다. ③ 선택된 표준유역에 대하여 중권역의 물순환 문제에 해당하는 물순환 건전성 평가 항목의 평가 결과를 검토한다. ④ 해당 평가 항목에 대한 건전성 평가 결과가 중권역의 물순환 건전성 관리 목표를 달성하는지 검토한다. ⑤ 달성되지 못한 표준유역이면, 해당 표준유역을 물순환 건전화 개선 사업의 대상 표준유역으로 선정한다. ⑥ 만일, 달성된 표준유역이면 차 순위의 표준유역을 선택하여 ③~⑤의 과정을 반복한다.



[그림 4] 물순환 건전화 개선 사업의 대상 표준유역 선정 절차

남강 중권역의 물순환 문제점은 물순환 건전성 관리 목표를 달성하지 못하는 표준유역의 수가 가장 많은 평가 항목으로 간주하였다. 그 결과, 남강 중권역에서는 미달성된 표준유역의 수가 7개로 가장 많은 치수 관리 분야의 물순환 문제가 가장 심각한 것으로 검토되었다.

남강 중권역 내 물순환 건전화 사업의 우선순위가 높은 표준유역은 201906이다. 해당 표준유역은 치수 관리 항목에 대한 물순환 건전성 관리 목표를 달성하지 못하므로 남강 중권역의 치수 관리에 관한 물순환 개선 사업의 적용 대상 유역은 201906 표준유역으로 선정될 수 있다.

4. 결론

이 연구에서는 유역의 체계적인 물순환 관리를 위한 물순환 건전성 평가방법을 제안하였다. 이러한 물순환 건전성 평가방법은 물관리기본법에 따른 국가의 건전한 물순환 실현과 관련된 국가 정책 방향과 부합한다.

물순환 정량화 및 건전성 평가를 통해 다양한 물 문제(물이용, 물환경, 물안전 등)가 발생하는 유역을 객관적으로 진단하고, 이를 개선할 수 있는 방안을 제시함으로써 유역의 물 문제 해결을 위한 기술적 정보 제공에 기여할 수 있다. 또한, 합리적인 물순환 건전성 평가방법은 유역의 물순환 상태를 객관적으로 분석하여 투명한 정책 수립, 국민의 정책 수용성 제고, 물 관련 갈등 경감 등에 기여하여 궁극적으로 효과적인 국가 물관리 정책 수립에 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (2020003050002).

참고문헌

- [1] 관계부처 합동, “제1차 국가물관리기본계획(2021-2030)”, 2021년.
- [2] K-water, “정량적 유역 물순환 평가체계 구축 및 활용”, 2022년.