



# Budyko 프레임워크 기반 동적 물수지 모형을 활용한 월 단위 물순환 평가체계 개발

## Development of Monthly Hydrological Cycle Assessment System Using Dynamic Water Balance Model Based on Budyko Framework

김계웅<sup>a</sup> · 황순호<sup>b</sup> · 전상민<sup>c</sup> · 이현지<sup>d</sup> · 김시내<sup>e</sup> · 강문성<sup>f, †</sup>

Kim, Kyeung · Hwang, Soonho · Jun, Sang-Min · Lee, Hyunji · Kim, Sinae · Kang, Moon Seong

### ABSTRACT

In this study, an indicator and assessment system for evaluating the monthly hydrological cycle was prepared using simple factors such as the land use status of the watershed and topographic characteristics to the dynamic water balance model (DWBM) based on the Budyko framework. The parameters of DWBM are introduced as hydrologic cycle indicators. An indicator estimation regression model was developed using watershed characteristics data for the introduced indicator, and an assessment system was prepared through K-means cluster analysis. The hydrological cycle assessment system developed in this study can assess the hydrological cycle with simple data such as land use, CN, and watershed slope, so it can quickly assess changes in hydrological cycle factors in the past and present. Because of this advantage is expected that the developed assessment system can predict changes in the hydrological cycle and use an auxiliary tool for policymaking.

**Keywords:** Watershed management; hydrological cycle distortion; hydrological indicator; budyko curve; dynamic water balance model

### 1. 서론

물순환 왜곡 (distortions of the hydrological cycle)은 자연계 물순환의 과정 중 지표유출이 증가하고 증발산, 침투, 기저유출이 감소하며 유출 속도가 증가하는 등의 일련의 현상을 말한다 (Kuchment, 2004). 이러한 자연계 물순환은 기후변화, 도시화, 토지이용 변화 등과 같은 다양한 인간활동의 영향으로 지속적으로 변화, 왜곡되고 있다 (Barnett et al., 2008; Milly

et al., 2008; Wagener et al., 2010; Vogel et al., 2011; Wang and Hezazi., 2011; Pumo et al., 2017; Oudin et al., 2018). 왜곡된 물순환으로 인해 발생하는 지표유출의 증가, 유출 속도의 증가는 월 단위 이하의 단기 물순환 문제를, 증발산, 침투, 기저유출의 감소는 연 단위 이상의 장기 물순환 문제를 일으킨다.

왜곡된 물순환을 회복하는 것은 수자원 분야의 주요 관심사이며, 국내에서는 비점오염원 관리 종합대책 (RMC, 2020)에 시·도별, 소권역별 불투수면적률과 물순환을 목표를 설정하여 지표유출을 줄이고, 침투, 저류 비율을 늘리는 단기 측면에서의 물순환을 회복하고자 하는 정책이 진행되고 있다. 정책의 효과적인 시행을 위해서는 첫 번째로 물순환 왜곡을 일으키는 원인을 파악하고, 그에 따른 변화를 정량화하는 것이 필요하며, 두 번째로 물순환의 현황을 파악하고, 정책 시행 효과를 평가할 수 있는 지표와 등급체계의 활용이 필요하다. 하지만 자연계 물순환은 다양한 요인에 의해 영향을 받기 때문에 변화 요인 파악과 변화량의 정량화는 수문학자들의 주요한 도전 과제로 남아있다 (Wang et al., 2014). 이러한 부분은 일관된 물순환 현황을 평가할 수 있는 지표와 등급체계 마련을 어렵게 하고, 이는 효과적인 물순환 정책 시행을 막고 있어 이를 해결할 수 있는 새로운 체계 마련이 필요하다.

기후탄력기법은 물순환의 변화 원인 식별과 정량화 분석을

<sup>a</sup> Senior Engineer, Data Consulting Group, Samsung SDS  
<sup>b</sup> Research Scholar, Agricultural and biological engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign  
<sup>c</sup> Post-doc., Convergence Major in Global Smart Farm, Seoul National University  
<sup>d</sup> Ph.D. Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University  
<sup>e</sup> M.S. Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University  
<sup>f</sup> Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4582, Fax: +82-2-880-2087

E-mail: [mskang@snu.ac.kr](mailto:mskang@snu.ac.kr)

Received: September 24, 2021

Revised: February 19, 2022

Accepted: March 10, 2022

위해 활용되는 방법 중 하나로 강수량, 증발산 등의 변동이 유출에 미치는 영향을 분석하는 방식이다. Budyko 프레임워크 기반의 Budyko 곡선은 강수량, 잠재증발산량으로 실제증발산량 (또는 유출량)을 추정하는 기법으로서, 기후탄력기법에 활용되는 대표적인 방법이다.

Budyko 곡선 (Budyko, 1974)은 장기간의 물-에너지 균형이 강수량을 유출량과 실제 증발산으로 분할한다는 Budyko 프레임워크를 기반으로 제안된 0~2개 매개변수로 구성된 방정식으로서, 다음의 중요한 2가지 특징을 갖는다. 첫 번째는 유역마다 고유한 곡선을 가지고 있는 것이다. 두 번째는 유역 내 환경이 기후만 변화한다고 가정하면 유역의 증발지수 (강수에 대한 잠재증발산의 비)와 건조지수 (강수에 대한 실제증발산의 비)의 관계는 일정한 곡선 위에서 움직인다는 것이다. 이 두 가지 특징은 Budyko 곡선이 기후와 인간 활동에 의해 변화된 유출량을 각 원인별로 정량화할 수 있도록 하였다 (Wang and Hezazi., 2011; Hu et al., 2012; Xu et al., 2013). 기존의 Budyko 곡선은 일반적으로 연 단위 시간 규모 이상의 유역 물수지 분석에 활용되는 도구로 시간 규모가 작아질수록 그 정확도가 떨어진다고 보고되어 왔으나, Zhang et al. (2008)은 문제점을 개선한 동적 물수지 모형 (dynamic water balance model, DWBM)을 개발하여, 일, 월, 계절 단위 분석에도 활용 (Zhang et al., 2008; Hamel et al., 2017; Zhang et al., 2017)되고 있다.

한편, 물순환 왜곡도 평가체계로는 Black et al. (2005)이 32개의 수문학적 지표 (indicators of hydrologic alteration, IHAs)를 유역별로 적용, 분석한 바 있다. EU WFD (Water Framework Directive)의 기준과 비교하여 5개 등급으로 구분된 평가체계를 개발하였으나, 월별 평균 유량, 지속기간별 최대 유량 등 기상 조건에 영향을 많이 받는 지표가 평가에 활용되어 기상변동의 영향을 제외한 평가에는 한계가 있다. 국내에서도 다양한 연구자에 의해 물순환 왜곡도의 평가 또는 물순환 회복을 평가하기 위한 지표가 개발 (Choi et al., 2009; MOE, 2017)되었다. 하지만 등급체계 마련까지는 수립되지 않았으며, 이들 지표도 유출량, 증발산량 등 기상 조건에 영향을 많이 받는 값이 지표에 그대로 활용되어 정책 시행의 효과인 지 기상의 영향인지를 정확히 구분하여 평가하기에는 한계가 있다. 따라서 기상 변화를 반영한 일관된 물순환 평가를 위해서는 기존의 지표가 갖는 한계점을 보완한 새로운 지표의 개발과 그로부터 산정된 지표를 평가할 수 있는 물순환 등급체계 마련이 필요하다. Kim et al. (2021)은 전통적인 Budyko 곡선을 이용하여 기존의 한계점을 보완한 물순환 평가체계를 개발한 바 있으나 연 단위 이상의 평가에 제한되어 국내의 연 단위 이하 물순환 관리 정책의 평가를 위해서는 이를 개선

한 평가체계 마련이 필요하다.

본 연구에서는 연 단위 이하 시간규모에서 유역의 물순환 변화 원인 식별과 원인별 물순환 변화 정량화가 가능하고, 유역관리에 따른 물순환 개선 효과를 평가할 수 있는 물순환 평가지표와 등급체계 마련을 위해, (1) Budyko 프레임워크 기반의 Budyko 곡선으로 월 단위 시간 규모의 유역 물수지를 분석하고 곡선의 매개변수를 유역 물순환 평가지표로 도입하며, (2) 평가지표와 유역 특성 간의 군집 분석을 통해 유역 물순환 수준을 평가할 수 있는 등급체계를 마련하고, (3) 개발된 지표의 적용성 평가를 위하여 지표추정 회귀모형을 개발하고, 이를 물순환 평가에 활용함으로써 그 적용성을 평가하고자 한다.

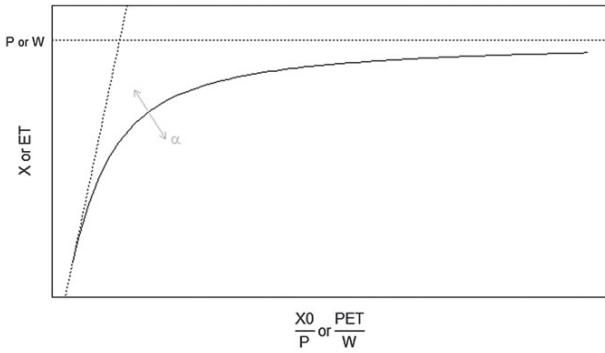
## II. 재료 및 방법

### 1. Budyko 프레임워크 기반 동적 물수지 모형

Budyko 프레임워크는 Budyko (1958, 1974)의 장기간의 증발산량이 주로 물 공급 (강수량)과 증발수요 (순복사 또는 잠재증발산량) 사이의 균형에 의해 결정된다는 가정에 기반한 유역의 장기간 증발산량과 유출량을 해석하는 모델이다. 본래의 Budyko 프레임워크는 1년 이상의 장기간의 평균 자료를 활용하고, 대규모 유역 (10,000 km<sup>2</sup> 이상)에서 신뢰성이 최대에 도달하도록 되어 있으며, Budyko 곡선의 신뢰도는 단기간의 물수지를 해석할 때 감소하는 것으로 보고되고 있다 (Donohue et al., 2007). 따라서, 단기간의 시간 규모에 Budyko 프레임워크를 적용하기 위해서는 유역의 물수지 균형을 제어하는 추가요소 (토양수분량, 식생타입, 토지피복, 평균 강우저장량, 유효토양깊이 등)가 고려된 모델을 활용하는 것이 필요하다 (Wang et al., 2016).

Zhang et al. (2008)은 Fu 방정식으로 표현되는 연간 물수지 균형을 더 짧은 시간규모로 분석하기 위해서는 유역의 물 저장 영향을 고려하는 것이 필요하며, 이를 위해 더 복잡한 모델이 필요하다고 보고하였다. 수요 및 공급 프레임워크 또는 한계개념 (limit concept)을 기반으로 연 단위 시간규모 이하의 분석을 위한 동적 물수지 모델 DWBM (dynamic water balance model)을 개발하였고, DWBM은 유역을 2개의 저장소 (vadose zone과 groundwater)로 구분하여 모의한다.

모델은 먼저 월별 강수량을 유역 습윤량 (catchment wetting)과 지표 유출량으로 나눈다. 한 달 (m)간의 유역 습윤량 (X)은 공급한계 (P<sub>m</sub>, 해당 월의 강수량)와 수요 한도 (X<sub>0</sub>)에 의해 제한된다. 수학적으로 이 한계개념은 Fig. 1과 같은 bi-asymptotic function으로 표현되고, 유역 습윤량 (X)은 식



**Fig. 1** Curve and limit concept for water partitioning such as surface runoff and evapotranspiration in DWBM (Hamel et al., 2017)

(1)과 같다. Fig. 1은 DWBM에서 지표유출량, 증발산량 등을 나누는데 활용되는 한계 개념과 Fu 방정식 기반의 곡선을 표현하며,  $\alpha$ 가 커질수록 한계에 가까워지고, 작을수록 x축에 가까워지게 된다.

$$X(m) = P(m)F\left(\frac{X_0}{P(m)}, \alpha_1\right) \quad \text{식 (1)}$$

여기서 F는 bi-asymptotic function이고, 식 (2)와 같다.

$$F(x, \alpha) = 1 + x - \left(1 + x^{\frac{1}{1-\alpha}}\right)^{1-\alpha} \quad \text{식 (2)}$$

$\alpha_1$ 은 잔류효율 (retention efficiency)로 X가 공급과 수요한계에 얼마나 가까운지를 결정하는 매개변수이다. 수요한계  $X_0$ 는 이용 가능한 저장용량과 증발산 수요의 합 (여기서는 잠재증발산량, PET)으로 계산된다.

$$X_0(m) = S_{\max} - S(m-1) + PET(m) \quad \text{식 (3)}$$

여기서,  $S_{\max}$ 는 유역에 저장할 수 있는 최대 수자원 용량이고, S는 계산단계에서 유역에 저장된 양이다. 매월 계산단계에서 X는 중간변수인 잠재적으로 이용가능한 물 W (available water)를 계산하는데 사용된다.

$$W(m) = X(m) + S(m-1) \quad \text{식 (4)}$$

또한, 유역에 저장되지 않고 빠르게 유출되어 하천으로 유입되는 지표유출량  $Q_d$ 는 식 (5)와 같다.

$$Q_d(m) = P(m) - X(m) \quad \text{식 (5)}$$

W는 증발산, 저장 (storage), 충전 (recharge)으로 분리된다. 이를 위해, 모델은 증발산 기회 Y를 계산한다. Y는 근구역 (root zone)에서 아래로 침투되지 않고, 충전 (recharge, R)되는 물의 비율이다. Y의 공급한계는 W인 반면에 수요한계는 잠재증발산량과 저장량 (storage)의 합이며, 식 (6)과 같다.

$$Y(m) = W(m) \times F\left(\frac{PET(m) + S_{\max}}{W(m)}, \alpha_2\right) \quad \text{식 (6)}$$

여기서,  $\alpha_2$ 는 증발산 효율 (evapotranspiration efficiency)로 Y가 공급과 수요한계에 얼마나 가까운지 결정한다 (Fig. 1). 월별 실제증발산량 ET는 W와 잠재증발산량 (PET)에 의해 제한된다. ET는 Y와 동일한 식을 따른다고 가정하며, 증발산 효율  $\alpha_2$ 는 ET가 증발산 수요에 얼마나 가까운지를 결정한다.

$$ET(m) = W(m) \times F\left(\frac{PET(m)}{W(m)}, \alpha_2\right) \quad \text{식 (7)}$$

이 때, 충전량 (recharge, R)은 W와 Y의 차로 계산된다.

$$R(m) = W(m) - Y(m) \quad \text{식 (8)}$$

그리고, 저장량 (storage, S)은 Y와 ET의 차이이다.

$$S(m) = Y(m) - ET(m) \quad \text{식 (9)}$$

마지막으로, 월별 지하유출은 다음과 같다.

$$Q_b(m) = dG(m-1) \quad \text{식 (10)}$$

여기서 d는 지하수 배수율을 의미하는 지하수 저장 시간 상수이며, G는 매달 갱신되는 지하수 저장량이다.

$$G(m) = G(m-1) - Q_b(m) + R(m) \quad \text{식 (11)}$$

총 유출량은 지표유출량과 지하유출량의 합으로 계산된다.

$$Q_t(m) = Q_d(m) + Q_b(m) \quad \text{식 (12)}$$

위의 과정을 통해 Zhang et al. (2008)은 DWBM이 기존 Budyko 프레임워크에서 몇 가지 변수를 추가함으로써 단기 물수지 분석에 활용할 수 있다고 보고하였으며, Zhang et al. (2017)과 Hamel et al. (2017) 등에 의해 적용성 및 활용성이

분석되었다.

## 2. 연구 대상 지역

연구 대상지는 한강 유역 내에 북한과 접하지 않은 183개 소권역을 연구 대상으로 선정하였다 (Fig. 2). 유역 내에는 48개의 유량측정지점과 27개의 기상관측소가 위치하고 있어 자료 취득이 용이하며, 농업유역, 산림유역, 도시유역 등 다양한 종류의 토지이용을 갖는 유역이 분포하고 있다. Table 1은 대

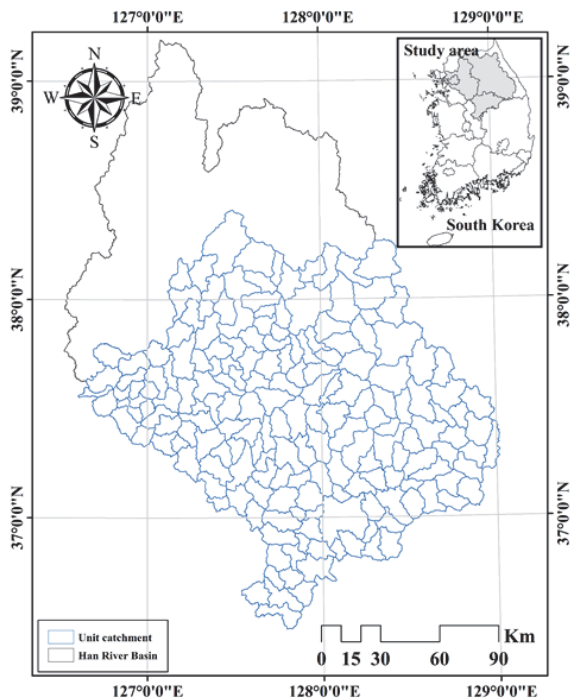


Fig. 2 Locations of the 183 unit catchments in this study

상유역의 특성을 나타내고 있다. 연구 대상지 내 소권역의 유역면적은 39.2~449.8 km<sup>2</sup>의 범위로 다양한 크기를 가지고 있으며, 기존 Budyko curve를 적용한 선행연구 (Li et al., 2013; Xu et al., 2013; Bai et al., 2020)에 비해서는 작은 유역을 대상으로 하였다. 건조지수 (잠재증발산량/강수량)는 0.2~1.8의 범위를 가지고, 평균 0.7로 나타났으며, Huang et al. (2016)이 분류한 기준에 의하면 연구대상지의 기후는 습한 지역에 해당하였다.

## 3. 물순환 평가지표

DWBM은 유역을 2개의 저장소로 구분하고 강수량을 지표 유출량, 증발산량, vadose zone 저장량, 지하수 충전량, 기저유출량 등을 산정하는 과정을 가지고 있다. 산정과정에서 지표 유출량과 유역 습윤량의 구분, 실제 증발산량과 충전량 간의 구분에 Fig. 3과 같이 Fu 방정식의 형태가 동일하게 사용되며, 각각을 위해 매개변수  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 가 사용된다. 이때  $\alpha_1$ 이 크면 강우 시 지표유출의 비율이 낮고 침투, 기저유출, 증발산의 비율이 큰 것을 의미하며,  $\alpha_2$ 가 크면 침투, 기저유출되는 비율이 낮고 증발산의 비율이 커지는 것을 의미한다. Kim et al. (2021)은 Fu 방정식의 단일 매개변수가 물순환 평가지표로 적용될 수 있음을 보고한 바 있어 본 연구에서도 Fu 방정식의 매개변수를 물순환 평가지표로 활용하고자 하였다. Zhang et al. (2017)은 DWBM이 일 단위 모의에서는 정확도가 다소 떨어지는 부분이 있으며, 월 단위의 모의에서 높은 신뢰도를 갖는다고 보고한 바 있어 본 연구에서는 월 단위 시간규모로 물순환을 평가할 수 있도록 하였다.  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$  모두 지표로 활용할 수 있으나, 국내에서 비점오염원관리종합대책 등에서 목표로 활용되고 있는 물순환을 등의 지표가 지표유출량에

Table 1 Summary characteristics of 183 catchments (Kim et al., 2021)

Watershed Characteristics	Min	Max	Average	Standard Deviation
Annual average precipitation (mm)	586.8	2991.8	1291.8	346.8
Annual average evapotranspiration (mm)	675.7	1103.8	850.4	64.3
Aridity index	0.2	1.8	0.7	0.2
Watershed area (km <sup>2</sup> )	39.2	449.5	126.9	66.9
Built-up (%)	0.2	70.1	7.7	13.5
Agriculture (%)	0.0	60.8	14.5	10.8
Forest (%)	2.9	96.6	68.5	21.2
Grass (%)	0.0	16.8	3.7	2.6
Wetland (%)	0.0	13.8	0.7	1.1
Barren (%)	0.1	59.1	2.5	5.5
Water (%)	0.1	20.4	2.5	3.3



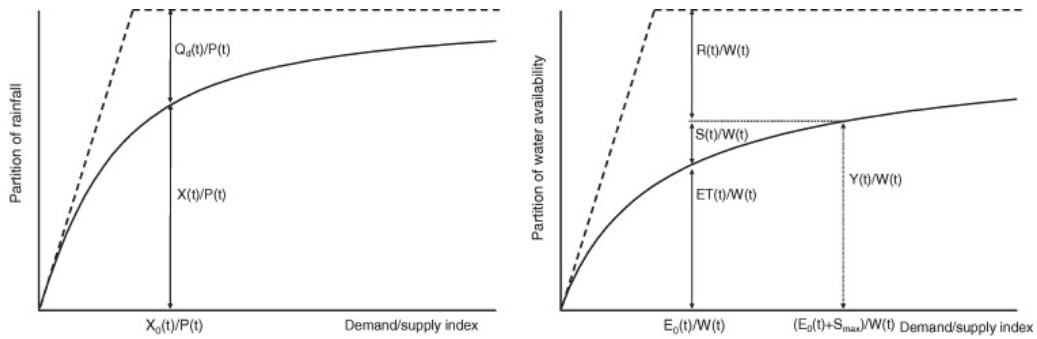


Fig. 3 Curves and parameters that partitioning surface runoff from evapotranspiration in DWBM (Hamel et al., 2017)

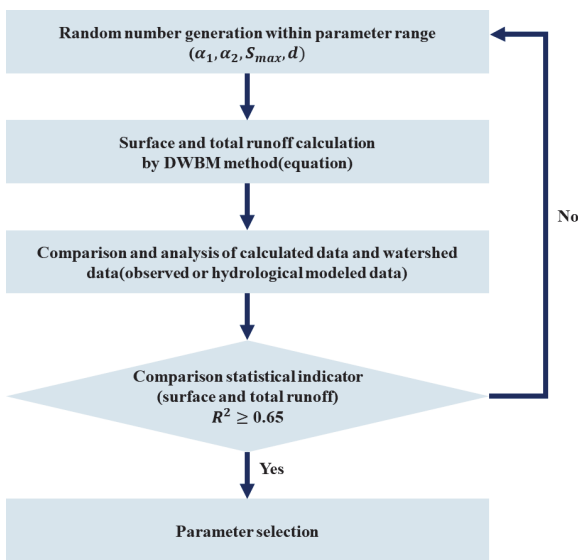


Fig. 4 Estimation process of DWBM parameters

초점이 맞추어져 있는 것에 따라 강수량을 지표유출로 구분하는 매개변수인  $\alpha_1$ 을 물순환 평가지표로 활용하였다.

유역별로 고유한 지표  $\alpha_1$ 을 도출하기 위해서는 지표유출량, 총유출량, 기저유출량, 토양 저장량 등을 재현할 수 있도록 DWBM의 4가지 매개변수 ( $\alpha_1, \alpha_2, S_{max}, d$ )를 최적화하는 것이 필요하며, 이를 위해서는 실측된 수문자료가 필요하다. 하지만 이러한 자료를 모두 실측하는 것은 어렵기 때문에 본 연구에서는 기존에 적용성이 평가된 HSPF로 모의된 수문자료를 실측자료로 가정하고 이를 재현할 수 있는 최적의 DWBM의 매개변수를 추정하였다. 수문모델은 Kim et al. (2021)에 의해 보정된 모델을 활용하였으며, Fig. 4에는 DWBM 매개변수 추정과정을 나타내었다. DWBM의 4개 매개변수를 난수로 발생시킨 후 지표유출량과 총유출량을 모의하였으며, 수문모델로 모의된 결과와 비교하여 결정계수가 0.65 이상이 나타날 때까지 매개변수를 최적화하였다. Moriasi et al. (2015)는 수

문모델의 모의결과를 통계적 변량으로 평가하고 범위를 제시한 바 있으며, 월 단위 유역 수문 모델은 결정계수가 0.65 이상일 때 비교적 괜찮은 모델로 평가하고 있어 이 기준에 따라 평가하였다.

#### 4. 물순환 평가 등급체계

##### 가. 물순환 평가지표 추정기법

본 연구에서 제안된 유역 물순환 평가지표를 산정하기 위해서는 유역별로 장기간의 실측자료 또는 수문모형으로 생성된 유역의 유출량과 증발산량 등의 자료가 필요하다. 따라서 미계측 유역에의 적용과 매년 변화하는 유역 환경을 반영한 평가가 어렵다. 보다 용이한 유역별 물순환 왜곡도의 평가를 위해서는 간단한 독립변수를 통해 지표를 추정할 수 있는 기법의 개발이 필요하다. 선행 연구자 (Xu et al., 2013; Li et al., 2013; Xing et al., 2018, Hamel et al., 2017)들은 Budyko 곡선의 매개변수가 유역 특성과 상관관계가 있음을 회귀모델을 통해 보여주었으며, 본 연구에서는 토지이용 면적 비율을 이용하여 평가지표를 추정하기 위한 회귀모델을 개발하고자 하였다. 선행 연구에서는 다중회귀분석 (Xu et al., 2013; Li et al., 2013), 랜덤포레스트 (Hamel et al., 2017), 인공신경망 (Xing et al., 2018) 등의 회귀모델이 활용되었다. 본 연구에서는 추후 정책 활용에 있어서 지표 산정의 용이함을 고려하기 위해 다중회귀분석 기법을 이용한 회귀모델을 개발하고자 하였다. 본 연구에서는 단계선택방식으로 회귀모델을 구축하고자 하였으며, 독립변수가 1개로 설정되는 예에는 종속변수 추정 값의 범위를 다양하게 하고자 동시입력방식으로 회귀모델을 재구성하고자 한다.

##### 나. 물순환 평가 등급체계 개발 기법

평가지표를 보다 합리적으로 활용하기 위해서는 도출된 지표에 따라 유역이 어느 정도의 상태에 있는 것인지, 향후 개선

이 필요한지 유지만 되는 것으로 만족할 수 있는지를 등급화하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 앞서 산정된 물순환 평가 지표와 유역의 토지이용 비율, 유역특성 등의 자료를 활용하여 개발된 지표를 등급화하여 유역의 과거와 현재의 물순환을 평가하고자 한다.

등급화를 위해서 1단계로는 유역 특성과의 개발된 지표의 관계를 군집 분석하여 등급의 적정 개수를 구분하고자 한다. 군집 분석은 데이터들 사이의 거리 또는 유사성으로 군집을 구분하고, 군집 내의 데이터 유사성과 다른 군집 내 개체와의 차이를 규명하는 통계분석방법이다. 군집 분석은 변수의 설정, 군집의 개수 등에 따라 군집의 형태가 매우 다양하게 발생할 수 있으므로 데이터의 종류에 따라 적절한 군집 분석 방법을 선정하는 것이 중요하다. 수자원, 물환경 분야에서 군집 분석의 활용도가 높다 (Lee et al., 2020a; Lee et al., 2020b; Kim et al., 2021; Shin et al., 2019). 본 연구에서는 군집 분석 방법 중 계층적 군집 분석 (hierarchical clustering method)을 이용하여 덴드로그램을 통해 적절한 수의 군집으로 지표를 구분하고자 하였다. 하지만 계층적 군집 분석은 자료의 수가 많은 경우 덴드로그램을 통해 적절한 군집 수를 파악하는데 어려운 점이 있기도 하다. 이 부분을 해결하기 위해 K-Means 군집 분석으로 군집 수를 변경해가며 군집 분석을 수행하여 계층을 구분할 수 있는 군집이 생성되는 경우를 찾고자 하였다 (Kanungo et al., 2002; Shin et al., 2019). 군집 분석 기법을 적용하면 유역 특성 자료를 기반으로 물순환이 유사한 유역을 그룹화할 수 있으므로 물순환 체계의 왜곡도에 따라 지표를 등급화할 수 있을 것으로 판단하였다.

2단계로는 구분된 등급을 선행연구에서 활용된 기존 지표와 비교하여 최종 등급과 구분 기준을 마련하고자 한다. 2단계 과정에서 활용할 지표로는 불투수면적률과 Schueler (1994)와 Schueler et al. (2009)가 개발한 ICM (impervious

cover model)을 참고지표로 활용하였다. 불투수면적률은 국내의 소관역별, 광역시·도별 물순환 평가지표로도 활용되고 있고, EU에서도 물순환 관리를 위해 불투수면 관리 가이드라인 등을 수립하고, 규제 및 기금 (European regional development fund, ERDF)을 조성하여 불투수면을 관리하고 있는 등 기존에 지표로 활용도가 높아 본 연구의 등급체계 설정에 보조로써 활용되는 것이 용이할 것으로 사료되었다. ICM은 또한 불투수면적률에 따라 하천의 품질을 평가하였으며, 각 구간별로 정책적 필요성을 동시에 제안하고 있으므로, 정책적 방안 제시에도 용이할 것으로 판단하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 물순환 평가지표 산정

물순환 평가지표 산정을 위한 유역별 DWBM의 최적 매개변수 추정을 위해 DWBM의 매개변수 최적화에 활용할 유역의 수문자료를 HSPF 모형의 모의결과로 구축하였다. 수문자료 구축을 위한 모델은 Kim et al. (2021)이 보정한 모형을 활용하였으며, 일별로 모의된 지표유출량, 총유출량 자료를 월별로 합하여 활용하였다.

유역별 DWBM의 모의결과는 Fig. 5와 같은 통계적 변량을 나타내어 몇몇 유역을 제외하고는 HSPF의 결과를 비교적 잘 재현하는 것으로 나타났다. Fig. 6에는 보정된 매개변수의 범위별 빈도를 나타내었으며, 매개변수  $\alpha_1$ 은 대부분 0.6~0.9 구간에 분포하는 것으로 나타났고,  $\alpha_2$ 와 d는 비교적 고르게 분포,  $S_{max}$ 는 300~500구간에 분포하는 것으로 나타났다. 선행연구 (Hamel et al., 2017)에서는  $\alpha_1$ 은 0.40~0.74,  $\alpha_2$ 는 0.42~0.80,  $S_{max}$ 는 36.5~500, d는 0.1~1.0 범위에 나타났으며, 선행연구에 비해 본 연구에서 도출된 매개변수는 넓은 범위에

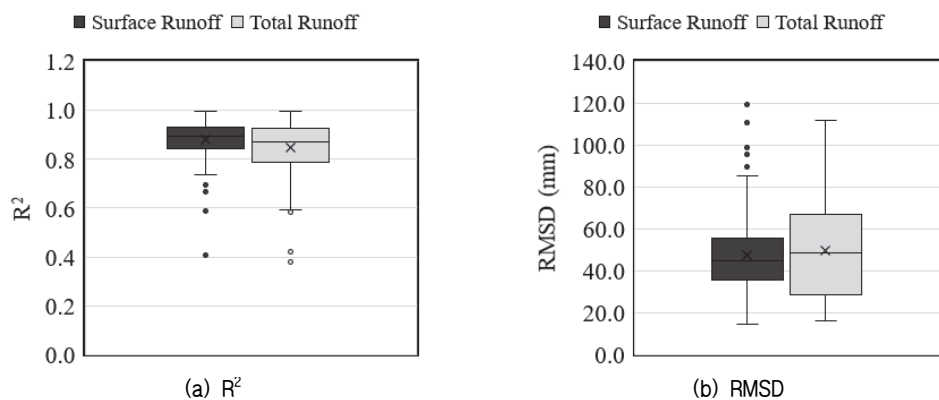


Fig. 5 Box-plot of statistical indicators of the DWBM simulation results for 183 study watersheds

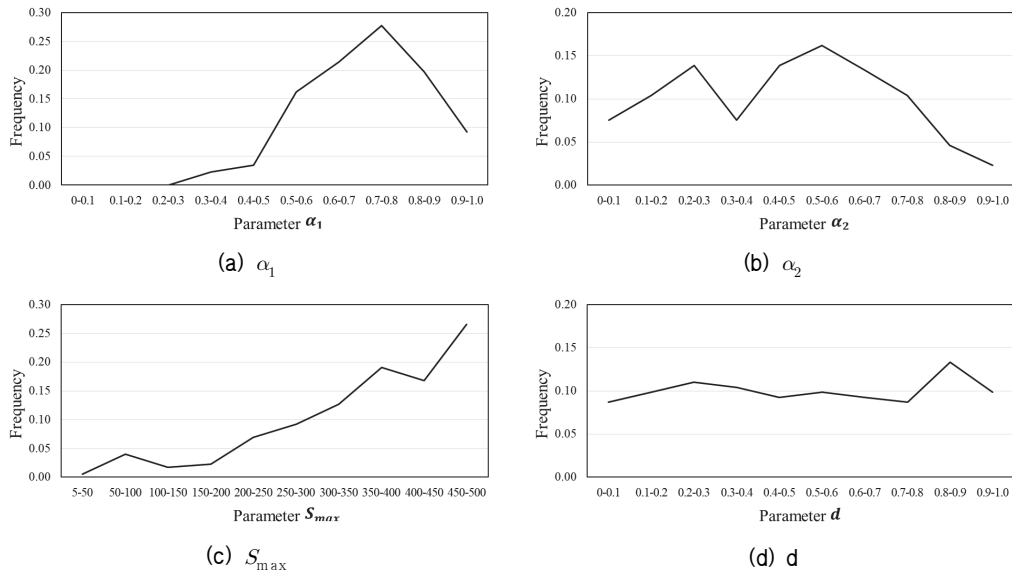


Fig. 6 Interval frequency of calibrated DWBM parameters

분포하는 것으로 나타났다. 이는 대상 유역의 수가 본 연구에서 더 많은 유역을 대상으로 분석되어 범위가 넓게 분포된 것으로 사료된다.

## 2. 물순환 평가 등급체계 개발

### 가. 물순환 평가 지표 추정기법 개발

DWBM의 매개변수는 강수량, 산림면적비율, CN, 포화토양수분함량, 유역 경사 등 다양한 유역 특성을 설명할 수 있는 변수로 구성되어 있다 (Hamel et al., 2017). 본 연구에서는 지표 추정의 용이함을 위해 토지 피복도만을 활용하여 매개변수와와의 관계를 도출하고자 하였으며, 추가로 과거 선행 연구에서 가장 상관성이 높은 것으로 나타났던 CN과 유역 경사를

추가 변수로 선정하여 DWBM 매개변수  $\alpha_1$ 과의 상관관계를 분석하였다 (Table 2).

상관분석 결과  $\alpha_1$ 은 시가지, 산림, 초지, CN, 유역경사 등이 유의한 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 시가지 및 산림과 상관성이 높았으며, 시가지와는 음의 상관성을, 산림과는 양의 상관성을 갖는 것으로 나타났다. 미계측 유역에서의 지표 추정을 위해 상관성 있는 유역특성 인자와 단계선택방식으로 다중회귀분석하였으며, Table 3은 회귀분석 결과를 나타내고 있으며, Stepwise는 단계선택방식에 의한 결과를 Enter는 매개변수 입력방식에 의한 결과를 나타내고 있다. 하지만 단계선택방식에 의해서는 하나의 매개변수만이 선택됨에 따라 지표의 예측 범위가 제한적인 한계가 있었다. 이를 보완하

Table 2 Results of Pearson's correlation analysis between watershed characteristics and DWBM parameter  $\alpha_1$

Contents	Built-up	Agriculture	Barren	Forest	Grass	Water	Wet-land	CN	Slope
Correlation coefficient	-0.595**	-0.072	-0.139	0.503**	-0.254**	-0.152*	-0.002	-0.351**	0.432**
p-value	0.000	0.349	0.069	0.000	0.001	0.045	0.974	0.000	0.000

\*\* . The correlation is significant (two-tailed) at the 0.01 level.

\* . The correlation is significant (two-tailed) at the 0.05 level.

Table 3 DWBM parameter estimation equation developed by stepwise multiple regression analysis

Estimation method	Equation	R	R <sup>2</sup>	MAE
Stepwise	-0.006 x built-up + 0.762	0.595	0.354	0.090
Enter	0.6938 - 0.0053 x built-up + 0.0027 x forest + 0.0010 x grass + 0.0034 x water - 0.0002 x CN - 0.0029 x slope	0.613	0.376	0.089

**Table 4** Results of K-means cluster analysis according to the number of clusters

Number of cluster	Cluster	$\alpha_1$			Means of watershed characteristics (%)						
		Min	Max	Ave.	Built-up	Agriculture	Forest	Grass	Water	CN	Slope
4	A	0.534	0.985	0.756	1.434	9.031	83.936	2.282	1.453	66.446	50.052
	B	0.505	0.962	0.739	6.272	18.196	64.944	4.906	3.111	66.964	33.647
	C	0.489	0.899	0.643	14.619	31.078	37.934	5.881	2.725	71.424	19.695
	D	0.376	0.516	0.445	53.400	6.644	21.949	6.755	6.802	84.746	13.073
5	A	0.534	0.985	0.756	1.434	9.031	83.936	2.282	1.453	66.446	50.052
	B	0.505	0.962	0.739	6.272	18.196	64.944	4.906	3.111	66.964	33.647
	C	0.533	0.899	0.663	10.467	35.315	38.315	5.221	3.010	70.168	20.213
	D	0.452	0.740	0.551	30.166	17.716	34.439	7.533	2.684	77.304	16.805
	E	0.376	0.516	0.438	57.424	3.676	20.659	6.949	7.110	85.270	13.018
6	A	0.539	0.985	0.751	1.649	10.337	82.011	2.477	1.794	59.901	47.035
	B	0.525	0.971	0.756	1.463	8.422	84.611	2.254	1.174	73.138	51.756
	C	0.505	0.962	0.734	6.958	19.928	62.120	5.009	3.214	66.998	32.089
	D	0.489	0.899	0.653	10.709	39.107	30.809	6.102	3.321	71.128	17.157
	E	0.452	0.760	0.594	27.646	13.479	46.169	6.188	1.579	74.630	21.361
	F	0.376	0.516	0.445	54.881	6.194	20.240	6.982	7.332	85.187	12.443
Reclassify	A	0.505	0.985	0.750	2.999	11.996	77.792	3.131	1.989	66.613	44.745
	B	0.533	0.899	0.663	10.467	35.315	38.315	5.221	3.010	70.168	20.213
	C	0.452	0.740	0.551	30.166	17.716	34.439	7.533	2.684	77.304	16.805
	D	0.376	0.516	0.438	57.424	3.676	20.659	6.949	7.110	85.270	13.018

고자 각 매개변수별로 상관관계가 있는 인자를 모두 입력하는 회귀모형을 추가로 개발하였다. 두 방법 모두 유사한 결과를 나타내었으며, 지표가 되는  $\alpha_1$ 의 추정 범위 또한 이전에 비해 넓게 나타나 입력 방식으로 도출된 회귀모형을 사용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

#### 나. 물순환 평가 등급체계 마련 결과

물순환 평가를 위한 등급체계 마련을 위해  $\alpha_1$ 과 유의미한 관계를 갖는 것으로 나타난 시가지, 농업 등의 인자와 군집 분석을 하였다 (Table 4). 최적의 등급을 구분하기 위해 4~6개 군집으로 나누어 분석하였다. 군집은 주로 시가지, 농업, 산림, CN, 유역 경사의 영향을 받아서 분류되는 것으로 나타났다. 4개에서 5개 군집으로 군집을 변경할 때, 시가지 면적에 따라 1개의 군집이 더 분류되는 것으로 나타났으며, 5개의 군집에서 6개의 군집으로 변화할 때는 CN 값에 따라 하나의 군집이 더 생성되었으나  $\alpha_1$ 의 범위에는 큰 차이는 나타나지 않았다. 또한, 산림이 60% 이상을 차지하는 유역에서는 CN, Slope에 따라 군집이 세분화되었으나,  $\alpha_1$ 은 유사한 수준으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 군집 변화에 따른  $\alpha_1$ 의 범위 변화와

장기 물순환 평가체계를 4개 구간으로 분류하여 등급화 한 바 있는 Kim et al. (2021)의 선행 연구 결과를 참조로 4개의 군집으로 설정하고자 하였다. 4개의 군집으로 분석한 결과에서는 두 군집의  $\alpha_1$ 이 유사하여 5개의 군집으로 분석한 결과를 활용하고자 하였으며, C, D, E 그룹과 A와 B의 그룹을 하나의 그룹으로 종합하여 4개로 설정하고자 하였다. 재분류된 그룹의 특징은 Table 4에 나타내었다. 재분류된 그룹은 시가지 면적에 명확한 계층이 드러나는 것으로 나타났으며, 직접 유출은 불투수면에 의해 영향이 큰 것으로 알려진 점을 고려하여 장기 지표의 군집 경계 설정과 동일하게 불투수면적률에 기반하여 군집 경계를 설정하고, 이때 ICM의 기준을 참조하였다.

본 연구에서 군집 간 경계를 이루는 불투수면적률은 A와 B, B와 C 사이에서는 비교적 경계가 두드러지지만 C와 D 사이에는 경계가 모호한 점이 있었다. 여기서는 ICM을 참조하여 구분하였다. 경계가 두드러지는 부분에 대해서는 군집결과 그대로 분류하였으며, C와 D 사이에는 ICM의 Sensitive와 Imacted watershed의 구분이 되는 10%를 구분점으로 선정하였다. 이때의  $\alpha_1$ 은 불투수면적률과의 관계 분석을 통해 설정하였다 (Fig. 7). 불투수면적률 10% 이하의 유역에서는  $\alpha_1$ 의



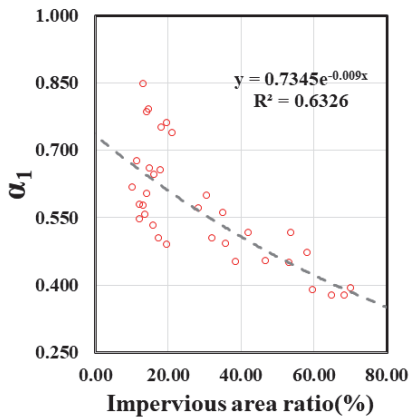


Fig. 7 Relationship between impervious area ratio and  $\alpha_1$  (10% or more impervious area ratio)

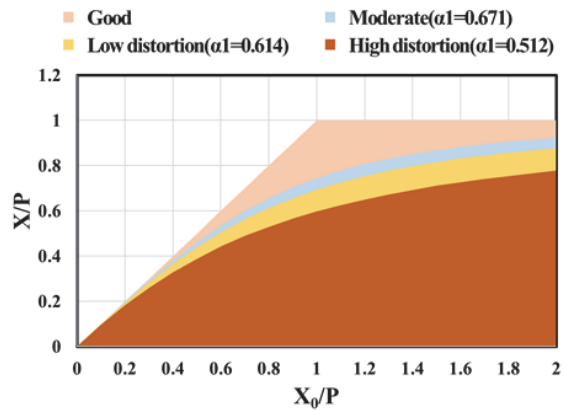


Fig. 8 Short-term hydrological cycle quality setting result of four grade (good, moderate, low distortion, high distortion)

Table 5 Parameters and impervious area ratio range for each cluster

Cluster	Count	$\alpha_1$			Impervious area ratio (%)			Boundary value	
		Min	Max	Ave.	Min	Max	Ave.	$\alpha_1$	Impervious area ratio (%)
A	136	0.534	0.985	0.756	0.21	18.25	3.00	$0.671 >$	$\leq 10.00$
B	20	0.505	0.962	0.739	3.74	19.59	10.47	$< 0.671$	$> 10.00$
C	8	0.489	0.899	0.643	19.57	38.59	30.17	$< 0.614$	$> 20.00$
D	9	0.376	0.516	0.445	42.11	70.07	57.42	$< 0.512$	$> 40.00$

산포가 넓은 범위에서 나타났기 때문에 10% 이상의 유역을 대상으로 회귀식을 구성하였으며,  $R^2$ 가 가장 높은 지수형 방정식을 택하였으며, 이를 통해 도출된 최종적인 등급체계 개발결과는 Table 5에 나타내었다. 그룹별 등급은 “Healthy”, “Good”, “Caution”, “High risk”로 구분하였으며, 구분된 등급은 Fig. 8과 같이 나타내었다.

### 3. 물순환 평가 등급체계 적용성 평가

개발된 지표와 등급체계의 적용성 평가를 위해 연구대상지의 과거 물순환을 평가하고 현재 수준과 비교하였다. 물순환 평가지표 추정기법을 이용하여 지표를 산정하기 위해 과거의 토지이용 자료와 CN, 유역 경사 자료를 수집하였다. 과거 자료는 수문시스템의 건강성이 가장 양호하였을 것으로 예상되는 개발 이전을 표현하고자 취득이 가능한 가장 과거 자료인 1975년도 기준의 토지피복도 자료를 활용하였다. CN은 과거의 수문학적 토양군 자료를 취득하는 것에 한계가 있어 현재의 수문학적 토양군과 과거의 토지이용자료를 중첩하여 산정하였다. 유역 경사 또한 과거 기준의 수치표고모델 자료의 확보가 어렵고, 개발에 따라 변화가 발생하였을 수 있으나 전체 유역에 대한 유역 경사의 편차가 적을 것으로 가정하고 현재

상태의 값을 적용하였다.

Fig. 9에는 과거와 현재의 토지이용 비율의 변화를 나타내었다. 현재 토지이용에 비해 과거에는 시가지지역의 비율이 적고, 농업지역의 비율이 높은 경향을 보여 개발 이전의 물순환이 비교적 건강한 상태였을 것으로 사료된다.

과거와 현재의 물순환 평가지표 비교결과  $\alpha_1$ 은 최대 0.26 감소하고, 최대 0.22 증가하였으며, 평균은 0에 가깝게 나타났다 (Fig. 10).

총 61개 유역에서 등급이 변하였으며, 모든 유역에서 악화되는 것으로 나타났으며 (Table 6). 유역의 분포는 불투수면이 증가한 지역과 산림이 많이 분포한 지역에서 다소 낮게 나타나는 결과를 나타내었다 (Fig. 11). 이는 개발된 물순환 평가지표가 유역 내 지표유출의 절대적인 양을 기반으로 평가하기 보다는 전체 유출량 중 지표유출의 비율이 높은 유역을 표현하기 때문에 변화가 크게 나타난 결과로 사료된다. 예시로 B등급에서 D등급으로 변화한 유역의 사례를 보면 불투수면의 비율이 14%에서 46%로 증가하였으며, 농경지는 40%에서 11%로 감소하였다. A등급에서 B등급으로 변화한 사례에서도 불투수면은 3%에서 17%로 증가, 농경지 면적은 32%에서 13%로 감소하는 등 도시화로 인한 불투수면 증가, 농경지 감

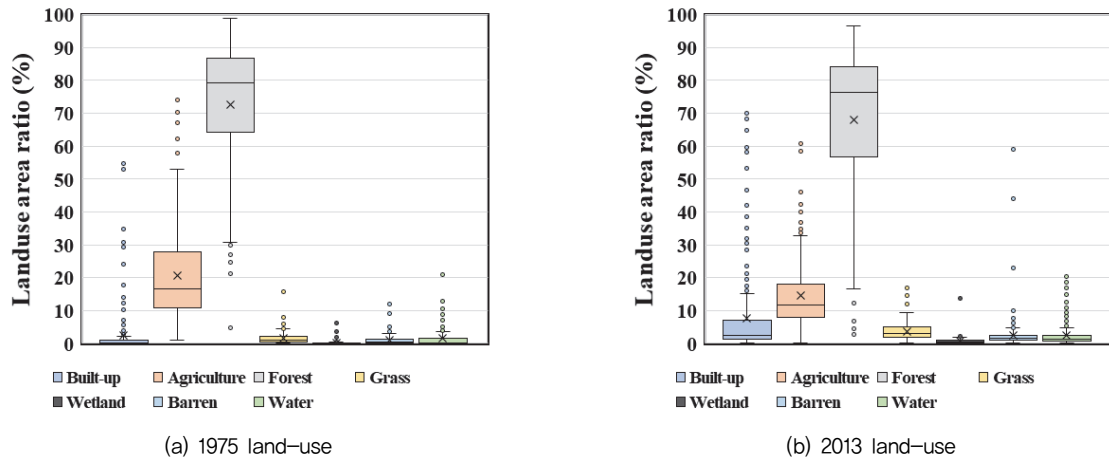


Fig. 9 Land-use area ratio box-plot of past and present (Kim et al., 2021)

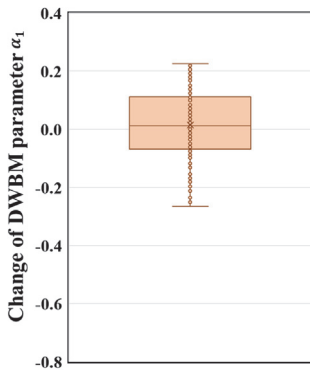


Fig. 10 Box-plot of short-term indicator variation from 1975 to 2013

Table 6 The number of watersheds in short-term hydrological cycle quality criteria at the past and present

Grade	Hydrological cycle quality	Past (1975) (unit: ea)	Present (2013) (unit: ea)
A	Good	152	104
B	Moderate	7	15
C	Low distortion	4	34
D	High distortion	1	11

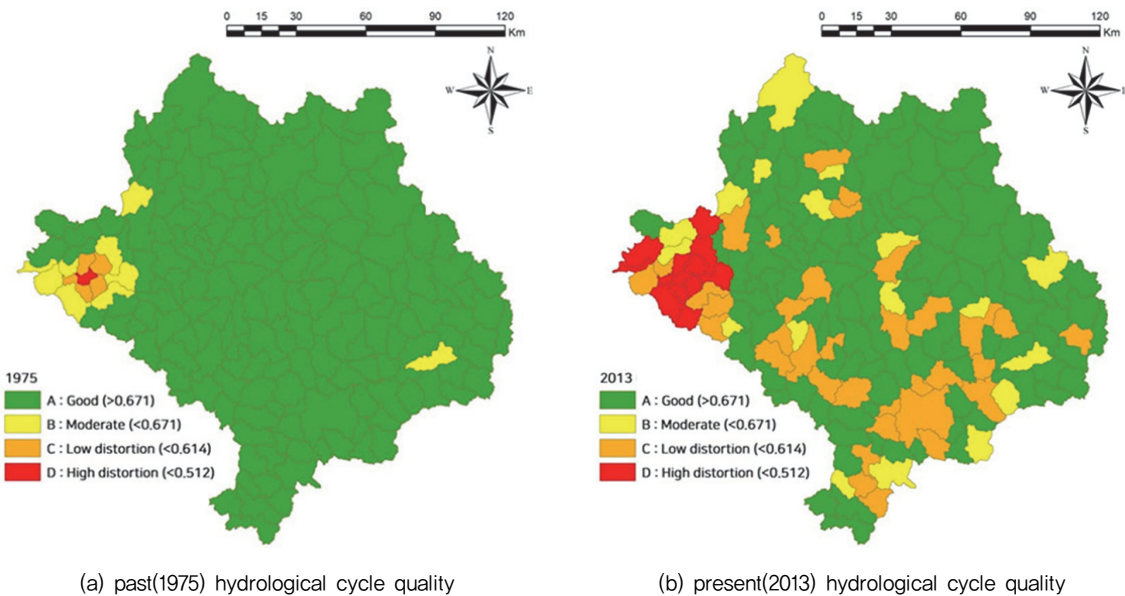


Fig. 11 Distribution map of past (1975) and present (2013) short-term hydrological cycle quality results by watershed

소는 등급 악화의 추세를 보여주었다. 한편, 산림이 많이 분포한 지역은 지표유출 비율이 높게 나타난 지역이 있었으며 등급을 낮추는 영향을 미쳤으나 C등급 이상으로 평가되었다.

본 연구에서 개발된 물순환 평가등급체계는 지표유출이 발생하는 비율을 의미하며 각 등급은 다음과 같은 정책을 계획하는 것이 필요함을 의미한다. 먼저 A 등급은 지표유출 비율이 낮아 특별한 관리 필요성이 요구되지 않으며, B 등급부터는 등급에 따른 관리가 별도로 필요하다. B 등급은 산림, 농업 지역의 비율이 높은 지역으로 산림에서 발생할 수 있는 유사와 논, 밭에서 지표유출로 인해 발생하는 농업비점오염의 관리가 필요한 지역으로 사료된다. C 등급은 도시화와 농업지역이 공존하는 지역으로, 도시 불투수면 관리시스템과 농업비점 오염을 동시에 관리하는 것이 필요하다고 할 수 있다. D 등급은 도시화된 지역으로 불투수면의 관리가 시급한 지역으로 평가할 수 있다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 Budyko 프레임워크 기반의 동적 물수지 모형으로 유역의 토지이용현황이나 지형특성 등 단순인자를 이용하여 유역관리에 따른 물순환 개선 효과를 평가할 수 있는 물순환 평가지표와 등급체계를 마련을 위해 아래의 절차를 진행하였다.

- (1) Budyko 프레임워크 기반의 동적 물수지 모형으로 월 단위 유역 물수지 분석을 통해 유역 물순환 평가지표를 도출하였으며,
- (2) 구축된 평가지표와 유역 특성 간의 관계의 군집 분석으로 유역 물순환 평가 등급체계를 마련하고, 미세측 유역에의 개발된 지표 적용을 위한 지표추정 회귀모형을 개발하였으며,
- (3) 개발된 회귀모형과 등급체계를 이용하여 유역별 과거의 물순환을 평가하고, 현재의 물순환 평가 결과와 비교하여 개발된 등급체계의 적용성을 평가하였다.

본 연구의 결과는 Budyko 프레임워크 기반의 Budyko 곡선의 매개변수가 유역 물순환을 평가할 수 있는 지표로 활용할 수 있음을 보여주었다. 평가지표  $\alpha_1$ 은 토지이용 비율과 상관관계가 높은 것으로 나타났으며, 특히 시가지, 산림과 높은 상관관계를 보여주었다. 각 지표는 유역 특성 요소와 군집 분석을 하였으며, 이 결과와 ICM을 이용하여 4개 등급의 물순환 평가 등급체계를 마련하였다. 개발된 지표와 평가 등급체계의 적용성 평가를 위해 유역별로 과거의 물순환을 평가하

고 현재 물순환과 비교하였으며, 과거 대비 유역 물순환 평가 결과가 악화되는 것으로 나타났다.

결론적으로, 본 연구에서 개발된 지표는 유역 물순환의 변화 원인을 식별하고, 물순환 변화를 정량적으로 평가할 수 있는 지표로 활용할 수 있음을 보여주었다. 하지만 개발된 지표 추정 회귀모형은 적용성의 범용화를 위해 단순회귀모형으로 추정되어 정확도가 다소 낮게 추정되었다. 따라서 일부 지역에서 결과의 오차가 발생할 수 있으며, 지표가 낮은 유역에서는 정책 적용 이전에 추가적인 물순환 평가 분석이 필요하다. 개발된 평가지표는 지표유출의 양을 평가하기보다는 유역의 수자원 보유에 따라 지표유출의 비율을 결정하는 지표로 단독적으로 평가하는 것보다는 기타 장기 물순환을 평가할 수 있는 지표와의 연계를 통해 유역의 관리 방향을 설정하는데 도움을 주는 지표로 활용하는 것이 좋을 것으로 사료된다. 유역의 물순환 현황을 단순한 토지이용과 CN, 유역 경사 등을 이용하여 평가할 수 있으므로, 과거와 현재의 유역 물순환 요소의 변화를 쉽게 평가할 수 있으며 유역 내 개발에 따른 물순환 변화 예측에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

하지만 본 연구에서는 지표추정 회귀모형이 단순한 독립변수로 추정되어 유역 내 인위적인 흐름을 유발하는 저수지, LID 시설, 비점오염저감시설 등의 효과를 반영한 지표추정에 한계가 있으며, 그로 인해 유역관리 효과를 모두 반영하지 못하는 한계점이 있다. 또한, 다양한 유역 특성을 갖는 유역으로 평가지표를 개발하였으나, 연구대상지 외의 타 유역에서는 적용과 검증이 되지 않았기 때문에 개발된 지표의 타 유역 적용 가능성은 추후 검토되는 과정이 필요하다. 향후 지표추정 회귀모형에 토지이용 자료의 세분화, 유효 불투수면적의 반영, 저수지 효과의 반영 등이 추가된다면 유역관리 지표로서의 적용성을 향상할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반및재해대응기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음 (320046-5).

\* 본 논문은 김계웅의 2021년도 박사학위논문에서 발췌 정리하였음.

#### REFERENCES

1. Bai, P., X. Liu, D. Zhang, and C. Liu, 2020. Estimation of the Budyko model parameter for small basins in China.

- Hydrological Processes* 34(1): 125-138. doi: 10.1002/hyp.13577.
2. Barnett, T. P., D. W. Pierce, H. G. Hidalgo, C. Bonfils, B. D. Santer, T. Das, and M. D. Dettinger, 2008. Human-induced changes in the hydrology of the western United States. *Science* 319(5866): 1080-1083. doi: 10.1126/science.1152538.
  3. Black, A. R., J. S. Rowan, R. W. Duck, O. M. Bragg, and B. E. Clelland, 2005. DHRAM: a method for classifying river flow regime alterations for the EC Water Framework Directive. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 15(5): 427-446. doi: 10.1002/aqc.707.
  4. Budyko, M. I., 1958. The heat balance of the earth's surface, US Dept. of Commerce. Weather Bureau, Washington, DC, USA.
  5. Budyko, M. I., 1974. Climate and life (Vol. 508). New York: Academic press.
  6. Choi, W. H., J. W. Shin, H. J. Oh, M. H. Choi, and J. Y. Park, 2009. A study of index and method for estimating the rate of rehabilitated hydrological cycle. *Korean society of civil engineers* 2114-2117. (in Korean).
  7. Donohue, R. J., M. L. Roderick, and T. R. McVicar, 2007. On the importance of including vegetation dynamics in Budyko's hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences* 11(2): 983-995. doi: 10.5194/hess-11-983-2007.
  8. Hamel, P., A. J. Guswa, J. Sahl, and L. Zhang, 2017. Predicting dry-season flows with a monthly rainfall-runoff model: Performance for gauged and ungauged catchments. *Hydrological Processes* 31(22): 3844-3858. doi: 10.1002/hyp.11298.
  9. Hu, S., C. Liu, H. Zheng, Z. Wang, and J. Yu, 2012. Assessing the impacts of climate variability and human activities on streamflow in the water source area of Baiyangdian Lake. *Journal of Geographical Sciences* 22(5): 895-905. doi: 10.1007/s11442-012-0971-9.
  10. Huang, H., Y. Han, M. Cao, J. Song, and H. Xiao, 2016. Spatial-temporal variation of aridity index of China during 1960-2013. *Advances in Meteorology* 2016: 1-10. doi: 10.1155/2016/1536135.
  11. Kanungo, T., D. M. Mount, N. S. Netanyahu, C. D. Piatko, R. Silverman, and A. Y. Wu, 2002. An efficient k-means clustering algorithm: Analysis and implementation. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 24(7): 881-892. doi: 10.1109/TPAMI.2002.1017616.
  12. Kim, J. H., J. C. Joo, C. M. Ahn, and D. H. Hwang, 2021. Water quality assessment of 14 reservoirs in geum river basin using multivariate statistical analysis. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 43(3): 171-186. (in Korean). doi:10.4491/KSEE.2021.43.3.171.
  13. Kim, K., H. Kim, H. Lee, S. M. Jun, S. Hwang, J. H. Song, and M. S. Kang, 2021. Development and assessment of watershed management indicators using the Budyko framework parameter. *Sustainability* 13(7): 3864. doi: 10.3390/su13073864.
  14. Kuchment, L. S., 2004. The hydrological cycle and human impact on it. *Water Resources Management*, 40.
  15. Lee, H. C., Y. J. Cho, B. Lim, and S. B. Kim, 2020a. Study on the association of casualties and classification of heat wave weather patterns in South Korea using K-means clustering analysis. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 20(3): 11-18. (in Korean). doi: 10.9798/KOSHAM.2020.20.3.11.
  16. Lee, J., H. Ha, M. Lee, M. Lee, T. Kim, Y. Cha, and J. Koo, 2020b. Assessment of water quality of major tributaries in seoul using water quality index and cluster analysis. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 42(10): 452-462. (in Korean). doi:10.4491/KSEE. 2020.42.10.452.
  17. Li, D., M. Pan, Z. Cong, L. Zhang, and E. Wood, 2013. Vegetation control on water and energy balance within the Budyko framework. *Water Resources Research* 49(2): 969-976. doi: 10.1002/wrcr.20107.
  18. Milly, P. C. D., J. Betancourt, M. Falkenmark, R. M. Hirsch, Z. W. Kundzewicz, D. P. Lettenmaier, and R. J. Stouffer, 2008. Stationarity is dead: Whither water management?. *Science* 319(5863): 573-574. doi:10.1126/science.1151915.
  19. Ministry of Environment, 2017. A study on the selection and building of a water cycle city through the introduction of low-impact development. (in Korean).
  20. Oudin, L., B. Salavati, C. Furusho-Percot, P. Ribstein, and M. Saadi, 2018. Hydrological impacts of urbanization at the catchment scale. *Journal of Hydrology* 559: 774-786. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.02.064.
  21. Pumo, D., E. Arnone, A. Francipane, D. Caracciolo, and L. V. Noto, 2017. Potential implications of climate change and urbanization on watershed hydrology. *Journal of Hydrology* 554: 80-99. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.



- 09.002.
22. Relevant Ministerial Consortium., 2020. Third nonpoint source management comprehensive plan. 11-1480000-001720-13. Sejong Metropolitan Autonomous City: Ministry of Environment. (in Korean).
  23. Schueler, T. R., L. Fraley-McNeal, and K. Capiella, 2009. Is impervious cover still important? Review of recent research. *Journal of Hydrologic Engineering* 14(4): 309-315. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2009)14:4(309).
  24. Schueler, T., 1994. The importance of imperviousness. *Watershed protection techniques* 1(3): 100-101.
  25. Shin, H., Y. Choi, and J. Yi, 2019. Analysis of the local characteristics of flood damage vulnerability in an urban area: the Han river basin. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 19(5): 293-303. (in Korean). doi: 10.9798/KOSHAM.2019.19.5.293.
  26. Vogel, R. M., 2011. Hydromorphology.
  27. Wagener, T., M. Sivapalan, P. A. Troch, B. L. McGlynn, C. J. Harman, H. V. Gupta, and J. S. Wilson, 2010. The future of hydrology: An evolving science for a changing world. *Water Resources Research* 46(5). doi: 10.1029/2009WR008906.
  28. Wang, C., S. Wang, B. Fu, and L. Zhang, 2016. Advances in hydrological modelling with the Budyko framework: A review. *Progress in Physical Geography* 40(3): 409-430. doi: 10.1177/0309133315620997.
  29. Wang, D., and M. Hejazi, 2011. Quantifying the relative contribution of the climate and direct human impacts on mean annual streamflow in the contiguous United States. *Water Resources Research* 47(10). doi: 10.1029/2010WR010283.
  30. Wang, X., 2014. Advances in separating effects of climate variability and human activity on stream discharge: An overview. *Advances in Water Resources* 71: 209-218. doi: 10.1016/j.advwatres.2014.06.007.
  31. Xing, W., W. Wang, S. Zou, and C. Deng, 2018. Projection of future runoff change using climate elasticity method derived from Budyko framework in major basins across China. *Global and Planetary Change* 162: 120-135. doi: 10.1016/j.gloplacha.2018.01.006.
  32. Xu, X., W. Liu, B. R. Scanlon, L. Zhang, and M. Pan, 2013. Local and global factors controlling water-energy balances within the Budyko framework. *Geophysical Research Letters* 40(23): 6123-6129. doi:10.1002/2013GL058324.
  33. Zhang, L., K. Hickel and Q. Shao, 2017. Predicting afforestation impacts on monthly streamflow using the DWBM model. *Ecohydrology* 10(2): e1821. doi:10.1002/eco.1821.
  34. Zhang, L., N. Potter, K. Hickel, Y. Zhang, and Q. Shao, 2008. Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework—Model development and testing. *Journal of Hydrology* 360(1-4): 117-131. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.07.021.