



농업용 저수지와 토지이용변화가 유역 물순환에 미치는 영향 평가

Impact Assessment of Agricultural Reservoir and Landuse Changes on Water Circulation in Watershed

김석현^a · 송정현^b · 황순호^c · 강문성^{d,†}

Kim, Seokhyeon · Song, Jung-Hun · Hwang, Soonho · Kang, Moon Seong

ABSTRACT

Agricultural reservoirs have a great influence on the water circulation in the watershed. It is necessary to evaluate the impact on water circulation by the agricultural reservoir. Therefore, in this study, we simulated the agricultural watershed through linkage of Hydrological Simulation Program Fortran (HSPF) and Module-based hydrologic Analysis for Agricultural watershed (MASA) and evaluated the contribution of the agricultural reservoir to water circulation by watershed water circulation index. As a result of simulating the Idong reservoir watershed through the HSPF-MASA linkage model, the model performance during the validation period was R^2 0.74 upstream, 0.78 downstream, and 0.76 reservoir water level, respectively. To evaluate the contribution of agricultural reservoirs, three scenarios (baseline, present state, and present state without reservoir) were simulated, and the water balance differences for each scenario were analyzed. In the evaluation through the agricultural water circulation rate in the watershed, it was found that the water circulation rate increased by 1.1%, and the direct flow rate decreased by 13.6 mm due to the agricultural reservoir. In the evaluation through the Budyko curve, the evaporation index increased by 0.01. Agricultural reservoirs reduce direct runoff and increase evapotranspiration, which has a positive effect on the water circulation.

Keywords: Water circulation; agricultural reservoir; landuse change; HSPF-MASA linkage model; agricultural water circulation rate; Budyko curve

1. 서론

최근 기후변화, 불투수면 증가, 과도한 지하수 이용 등으로 유역 환경이 변화하고 있으며, 이에 따른 부작용으로 하천의 건천화, 지표유출량 증가, 증발산량 감소 등 물순환 구조가 왜곡되고 있다 (Kim, et al., 2011; Chung et al., 2017). 통합물 관리를 위해 시행된 물관리기본법에도 지속가능한 물순환 체계 구축이 제1조 (목적)에 언급되며 제9조에도 건전한 물순환을 강조하고 있어 물순환에 대한 관리가 중요하게 떠오르고 있다 (물관리기본법 2020. 5. 26. 시행). 지속가능하고 건전화

된 물순환을 위해서는 해당 유역의 물순환계를 정확히 파악하고 이를 고려하여 객관적으로 정량화할 수 있어야 한다 (Choi et al., 2009).

그중 우리나라의 농업유역은 주거 및 생활을 위한 시가지, 산림지와 농업 활동이 이루어지는 농경지, 작물의 생육에 필요한 물을 저장하기 위한 농업용 저수지, 공급을 위한 용·배수로가 존재한다 (Im, 2000; Song et al., 2013). 발작물 위주의 국의 농업유역과 달리 논 위주의 우리나라 농업방식은 물꼬를 이용해 담수 상태를 유지하는 영농활동이 이루어진다. 이러한 농업유역의 물순환을 모의, 평가하기 위해 많은 연구에서 농업유역을 저수지 상류유역, 수리시설물 (농업용 저수지 및 관개지구), 저수지 하류유역으로 구분하여 각 구역 별 특징을 반영할 수 있는 모델을 통해 분석을 수행하였다. Kang et al. (2016)은 대화, 당월저수지가 포함된 농업유역을 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크인 COMponent-based Modeling Framework for Agricultural water-Resources Management (COMFARM)을 개발하여 각 저수지의 상류, 저수지 및 관개지구, 하류 비관개지구로 구분해 모델링 및 분석하였다. Song (2017)은 모듈기반 농업유역 수문해석 시스템인 MASA를 활용해 이동저수지 유역을 분석하였으며, Lee et al. (2018)은 연계모델인 HSPF-MASA-CREAMS-PADDY를 활용해 용포저수지 유역을 상·하류, 저수지 및 관개지구로 구분해 모델링 및 분석하

^a PhD Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

^b Research Scholar, Department of Agricultural and Biological Engineering & Tropical Research and Education Center, University of Florida

^c Research Professor, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

^d Professor, Department of Rural Systems Engineering, Institute of Agriculture and Life Sciences, Research Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4582, Fax: +82-2-873-2087

E-mail: mस्कang@snu.ac.kr

Received: October 20, 2020

Revised: January 3, 2021

Accepted: January 3, 2021

였다. 또한 Kim et al. (2020)은 농업유역을 상·하류, 저수지 및 관개지구로 구분해 각 구역 별 직접유출을 정의하여 농업 유역을 평가하는 지표인 농업유역 물순환율을 제시하였다.

대표적 수리구조물인 농업용 저수지는 상류유역에서 발생하는 유출을 저수지에 저장하였다가 영농기 때 관개지구에 필요한 농업용수를 공급하며, 저수지 수위 상태에 따라 상류에서 발생하는 침투유출량을 감소시키는 역할도 한다 (Song et al., 2019). 또한 관개지구로 공급한 용수의 상당 부분은 하천으로 회귀하며 이는 비 강우 시의 하천 유량을 풍부하게 해준다 (Song et al., 2015a; Song et al., 2015b). 이처럼 농업유역의 물순환은 농업용 저수지를 중심으로 이루어지며, 저수지의 물 관리방식에 따라 크게 변화한다. 농업용 저수지에 따른 유역 수문 변화에 관한 연구는 꾸준히 이루어져 왔다. Lee et al. (2008)은 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용해 고삼, 금광 농업용 저수지의 방류량 고려 여부에 따른 하천 유출을 분석하였으며, Kim et al. (2009)는 농업용 저수지가 안성천 유역의 유출에 미치는 영향에 대하여 평가하였다. Hwang et al. (2012)는 황룡강 유역 저수지 군에 따른 하류 하천의 영향을 평가하였으며, Lee et al. (2015)은 지하수 이용 및 저수지가 하천 유량에 미치는 영향을, Lee et al. (2015)는 기후변화 시나리오를 고려하여 농업용 저수지 운영에 따른 하류하천 유량을 평가하였다. Cho et al. (2019)는 다목적댐 건설에 따른 하천상태 및 수문 환경 변화를 평가하였다. 기존의 농업용 저수지에 따른 유역 수문 변화에 관한 연구는 하류하천 유출량 및 생태변화 위주로 수행되어져 왔다.

Song (2017)은 MASA를 개발하여 이동저수지 유역의 모델링하고 유출변화를 분석하였다. 하지만 개념적 수문모형의

특성 상 유역 토지이용변화에 따른 침투, 유출변화를 반영하기 힘들고 유역 단위 물순환 분석을 위해서는 유출량뿐만 아니라 증발산량의 증감 및 유출특성 (직접, 기저 유출) 변화를 고려한 평가가 필요하다.

본 연구에서는 농업용 저수지 및 토지이용변화가 유역 물순환에 미치는 영향을 평가하기 위해, 토지이용변화에 따른 물순환 변화를 고려할 수 있는 HSPF모델과 농업용 저수지의 방류, 농업용수 공급을 고려할 수 있는 MASA모델을 연계하여 농업유역을 모델링하고, 유역 단위 물순환 평가법을 통해 농업용 저수지의 물순환 영향을 평가하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지

본 연구에서의 연구대상지인 진위교유역은 농업용 저수지인 이동저수지와 이동저수지로부터 공급받는 관개지구가 위치해있으며, 진위교 유량관측소를 기준으로 총 유역면적 193.05 km², 이동저수지를 기준으로 상류유역은 95.53 km², 하류유역은 관개용수를 공급받는 10.86 km²의 관개지구와 비관개지구 86.66 km²이다 (Fig. 1). 이동저수지는 유역 내 관개지구뿐만 아니라 유역 외부 7.04 km²에 관개용수를 공급하고 있다 (Song et al., 2013, 2015a). 유역 외부로 공급하는 관개용수는 저수지 건설 전에는 유역 내부에서 유출되나 건설 이후에는 외부로 전달되어 물수지 차이를 발생시킨다. 이에 본 연구에서는 모델의 보정 및 검증에는 반영하였으나, 이후 물순환 평가에서는 공급을 하지 않는 것으로 모델을 재구성하였다.

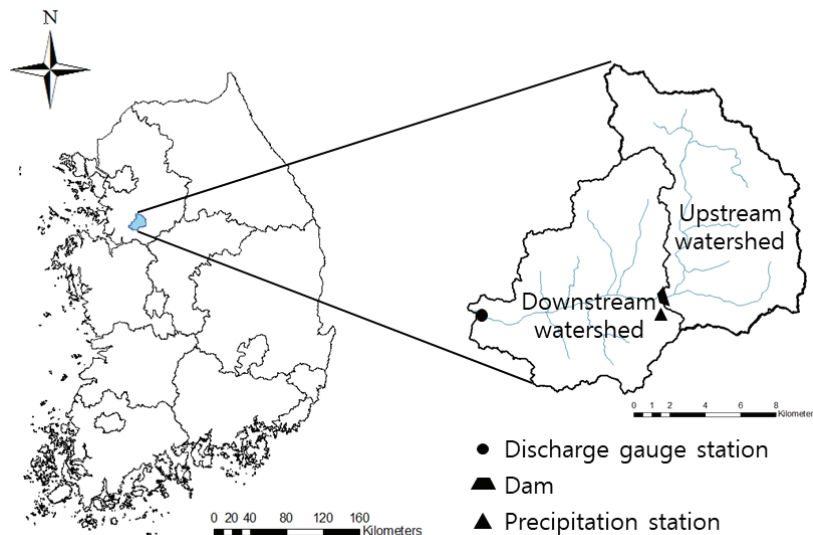


Fig. 1 Location of Jinwi watershed

2. 연계 모델 구성

본 연구에서는 농업용 저수지를 포함한 농업유역 모델링을 위해 HSPF와 MASA의 저수지 및 관개지구 모의모듈을 연계하여 Fig. 2와 같이 모델을 구축하였다. 먼저 저수지 상류유역은 HSPF를 통해 모의하며, 모의한 유출량은 저수지의 유입량으로 이용된다. 저수지는 MASA 모형의 저수지 모듈을 통해 모의하며 유입량과 저수지 제원자료를 통해 저수위, 방류량, 농업용수 공급량을 모의한다. 모의된 방류량은 하류 비관개지역 HSPF의 REACH에 유입되며, 농업용수 공급량은 MASA 관개지구 모듈에 이용된다. 관개지구 모듈에서 발생하는 배수량은 하류 비관개지역 HSPF의 REACH로 유입되도록 구성하였으며, 침투량은 하류 비관개지역 농업지역에 지하수 부분으로 유입되도록 구성하였다. 이는 TANK 모형과 연계했던 Song (2017)에서 적용된 방식과 유사하다. 마지막으로, 하류 비관개지역의 유출량은 HSPF를 통해 모의하였다. 각 모델 별 보 · 검정에 사용한 파라미터는 Table 1과 같다.

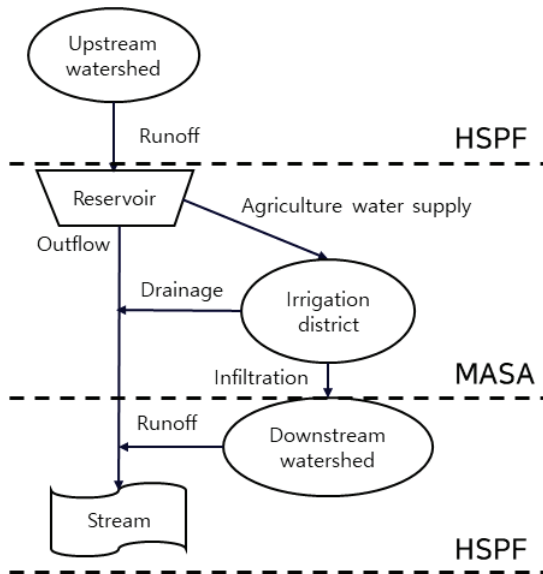


Fig. 2 Schematic diagram of HSPF-MASA linkage

Table 1 Calibrated parameter values for the HSPF-MASA linkage model

Model	Parameter	Definition
HSPF	LZSN	Lower zone nominal storage
	INFILT	Soil infiltration capacity index
	AGWRC	Groundwater recession coefficient
	UZSN	Upper zone nominal storage
	IRC	Interflow recession
MASA	IE	Irrigation efficiency

3. 농업용 저수지 유역 물순환 영향 평가

가. 시나리오 구성

농업용 저수지가 유역 물순환에 미치는 영향을 평가하기 위해 Eekhout et al. (2020)에서 제시한 비교 시나리오를 적용하였으며, 이는 Fig. 3과 같다. Baseline은 자연 상태 물순환으로 저수지 건설 및 토지이용변화가 일어나기 전의 시나리오이다. Present state는 현재 상태 물순환으로 저수지 건설 및 토지이용변화가 일어난 이후의 물순환이며, Present state without reservoir는 저수지가 없다고 가정하여, 토지이용변화만 일어났을 때의 물순환 변화이다. Baseline과 Present state의 물순환을 통해 저수지 건설 및 토지이용변화에 의한 물순환 변화를 확인하고, Present state without reservoir를 가정하여, 토지이용변화, 저수지 건설에 의한 효과를 구분하고자 하였다.

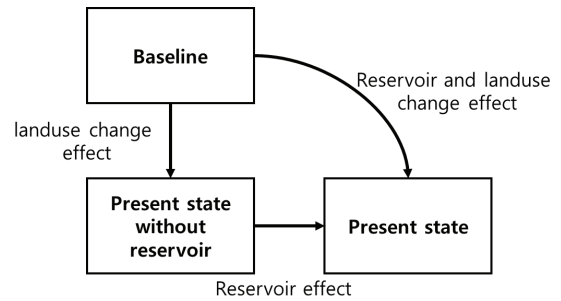


Fig. 3 Scenarios applied to assess the contribution to water circulation in the reservoir

나. 시나리오별 모델 구축

진위곡 유역의 물순환 변화와 농업용 저수지의 영향을 평가하기 위해 각 시나리오 별로 Table 2와 같이 모델을 구성하였다. Baseline (Scenario A)은 저수지 건설 전 자연 상태의 물순환으로 이동저수지는 1972년 준공하였으나, 취득 가능한 토지이용도 중 가장 과거 자료는 국가수자원정보시스템에서 제공하는 1975년 토지이용도이다. 이에 저수지 건설로 인해 생긴 수역은 유역 전체 비율을 이용해 다른 토지이용으로 수정하여 저수지 준공 이전 토지이용도로 가정하였다.

Table 2 Reservoir application and landuse for each scenario

Scenario	Description	Landuse	Reservoir module
A	Present state	2018	O
B	Present state without reservoir	2018	X
C	Baseline	1975	X

다. 유역 물순환평가

1) Agricultural Water Circulation Rate (AWCR)

Kim et al. (2020)은 농업유역은 농업용 저수지의 저류 효과와 농업용수 공급으로 인해 물순환 구조가 다르며, 이에 직접유출을 이용한 유역 단위 평가에서 이러한 물순환 구조를 고려한 평가 방법인 농업유역 물순환율을 제시하였다. 해당 연구에서는 농업유역을 저수지를 포함한 상류유역과 농업용수 공급을 받는 관개지구, 관개지구를 제외한 하류 비관개지역 세 가지로 구분하고 각 구분에 직접유출을 정의하였다. 저수지를 포함한 상류유역에서는 저수지 월류량에 상류유역 직접유출비율의 곱을, 관개지구에서는 강우로 인한 배수량을, 하류 비관개지역에서는 하류유역 직접유출량으로 정의하여 강우량에서 이들의 합을 빼는 개념으로 식 (1)과 같이 제시하였다.

본 연구의 대상지인 진위교 유역은 농업용 저수지인 이동저수지를 포함하고 있어, 평가 방법으로 선정하였으며, 산정에 필요한 수문곡선 분리법은 Eckhardt (2005)가 제시한 디지털 필터링 기법을 이용하였다.

$$AWCR = 1 - \left(\frac{Q_{over} \times R_{updirect} + Q_{paddy} + Q_{lateral\ direct}}{P} \right) \times 100 (\%) \quad (1)$$

여기서, Q_{over} 는 저수지 월류량을 의미하며, $R_{updirect}$ 는 상류유역 직접유출율, Q_{paddy} 는 논 배수량, $Q_{lateral\ direct}$ 는 하류비관개지역 직접유출, P 는 강우량을 의미한다.

2) Budyko curve

Budyko 프레임워크는 연 단위의 시간 규모에서 물순환 해석을 위해 사용하는 대표적인 모형으로 연평균 실제 증발산량 (E)과 강수량 (P)의 비인 증발지수 (Evaporative Index, EI)

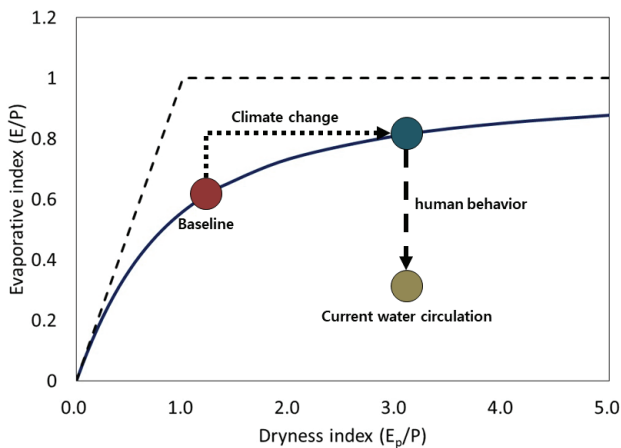


Fig. 4 Water circulation evaluation based on Budyko framework

와 연평균 잠재증발산량 (E_p)과 강수량의 비인 건조지수 (Dryness Index, DI)를 이용하여 지역의 연간 수문 순환 및 기후 특성을 설명하고자 하였다 (Budyko, 1974). Budyko 프레임워크는 토지이용변화, 댐 건설 등의 인간 활동이 없는 경우 기후조건이 변화하더라도 Budyko 곡선상에 존재한다는 기본 가정을 기반으로, 인간 활동이 개입하게 되면 실제증발산량이 변화하게 되며, 증발지수의 변화로 수직방향으로 움직일 수 있다. Fig. 4는 Budyko 프레임워크의 물순환 건강성 평가개념을 나타냈다.

본 연구에서는 많이 이용되고 있는 Fu (1981)가 제안한 방정식을 사용하였으며 식 (2)와 같다.

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_p}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_p}{P} \right)^\omega \right]^{\frac{1}{\omega}} \quad (2)$$

여기서, ω 는 매개변수이며, 관측자료 혹은 모델링 결과를 기반으로 결정하게 된다.

본 연구에서는 목적함수를 RMSE (Root Mean Square Error)로 하여 목적함수의 값이 최소가 되는 매개변수를 진위교유역 값으로 결정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 모델 구축

가. 모델 보정 및 검정

HSPF-MASA 연계모델을 이동저수지 유역에 적용하고 보정 및 검정한 결과는 Fig. 5와 같다. 저수지 상류 유역은 환경부 진위A1 지점의 7일 간격 유량 자료를 이용하여 보정하였으며, 총 자료 기간 2012~2017년 중 2016~2018년을 모델 보정에, 2012~2015년을 검정에 사용하였다. 보·검정 결과는 보정 기간 R^2 0.96, NSE 0.94, 검정 기간 R^2 0.74, NSE 0.74로 나타났다. 저수지 하류 유역은 환경부 진위교 유량관측소의 일 단위 유량 자료를 이용하여 보정하였으며, 총 자료 기간 2011~2018년 중 2015~2018년을 보정에 2011~2014년을 검정에 사용하였다. 보·검정 결과는 보정 기간 R^2 0.72, NSE 0.69, 검정 기간 R^2 0.78, NSE 0.71로 나타났다. 저수지 수위는 Song et al. (2015a)가 제시한 연 단위 관개 효율을 보정하는 방법과 Kim et al. (2020)가 적용한 기타 영농자료 매개변수를 활용하였다. 이동저수지 수위 자료의 총 자료 기간은 2002~2018년이며, 전체 기간에 대하여 R^2 0.76으로 나타났다.

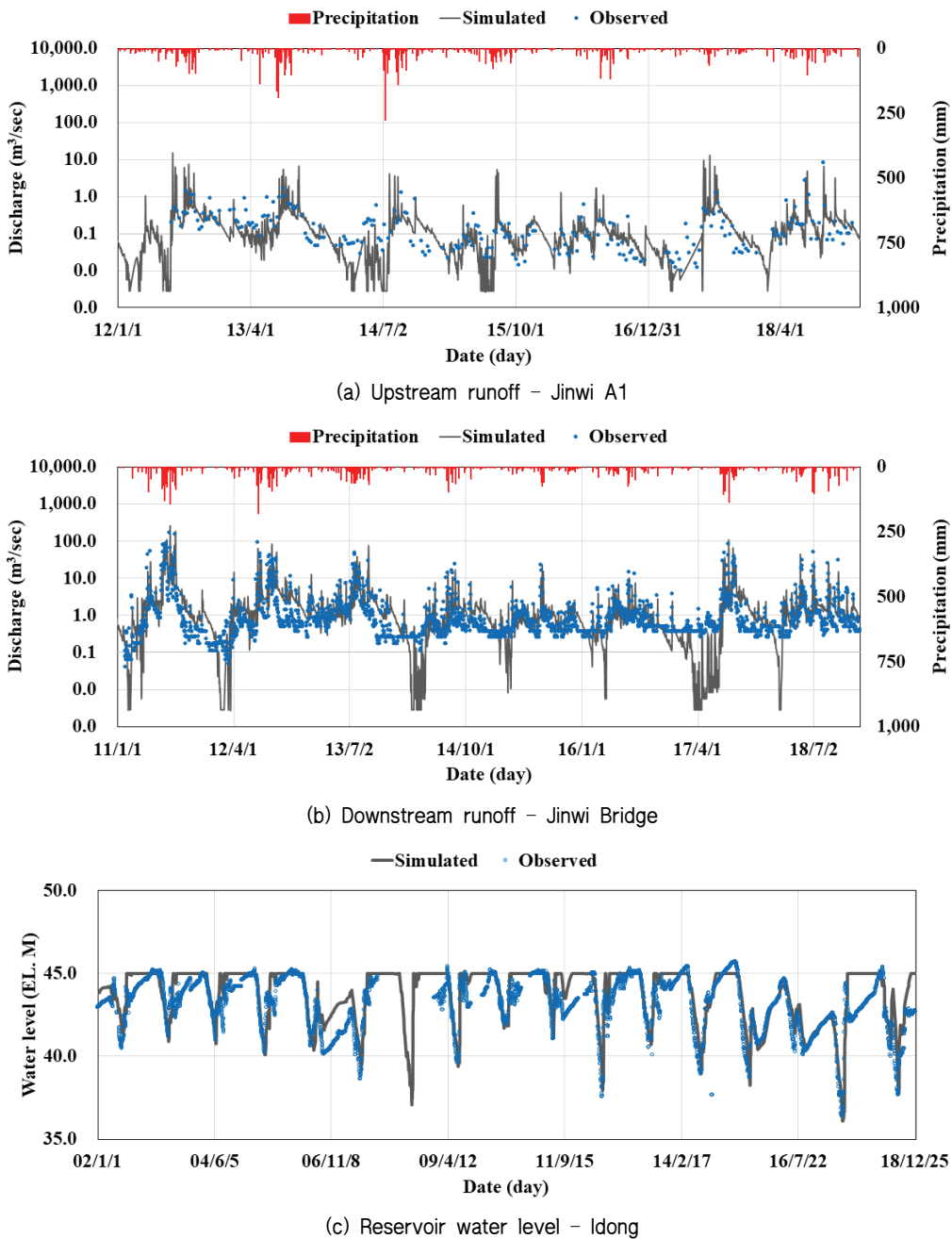


Fig. 5 Comparison of the observed with the simulated result (runoff and water level)

나. 토지이용변화

시나리오 모의를 위해 진위교 유역의 1975년과 2018년의 토지이용을 분석하였다. 국가수자원종합정보시스템에서 제공하는 1975년은 토지이용도와 환경공간정보시스템에서 제공하는 2018년 토지이용도를 이용하였다. Fig. 6은 연도별 토지이용도를 나타냈으며, 연도 별 면적과 비율은 Table 3과 같다. 시가화 지역은 1975년도 3.5 km²에서 10.8 km²으로 3배

이상 증가하였으며, 농경지는 24.5 km² 감소하였고, 산림은 7 km² 감소하였다.

2. 유역 물순환 평가

가. 농업유역 물순환평가

농업유역 물순환을 통해 진위교 유역을 평가하였으며,

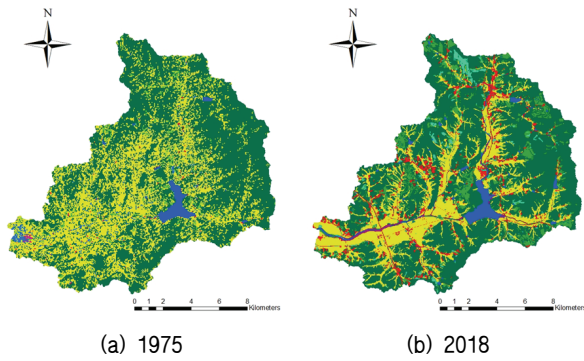


Fig. 6 Landuse change in Jinwi watershed (1975-2018)

Table 3 Changes in Landuse for this study area

Land use type	1975		2018	
	Area (km ²)	Percent (%)	Area (km ²)	Percent (%)
Urban	3.5	1.8	10.8	5.6
Agriculture	69.4	36.0	44.9	23.3
Forest	111.3	57.7	104.8	54.3
Pasture	4.6	2.4	20.1	10.4
Wetland	0.2	0.1	2	1.0
Bareland	0.6	0.3	4.8	2.5
Water	3.4	1.8	5.7	3.0
Total	193.1	100.0	193.1	100.0

산정된 직접유출량과 농업유역 물순환율은 Table 4와 같다. 모의기간 전체에 대하여 Scenario A는 71.4~92.8%의 범위와 평균 82.9%, Scenario B는 69.8~93.2%의 범위와 평균 83.3%, Scenario C는 68.5~91.9%의 범위와 평균 81.8%의 농업유역 물순환율을 나타냈다. 같은 유역이라도 연강우량에 따라 직접유출율이 큰 편차를 나타내기 때문에 평가를 위한 강우량 산정에 주의가 필요할 것으로 사료된다. 강우량이 적은 2016년도에서 가장 높은 물순환율을 나타냈으며, 강우량이 가장 많은 2011년도에서 가장 낮은 물순환율을 나타냈다. 이는 농업유역 물순환율을 통한 평가 시 침투, 증발산, 용수공급 등 유역 내에서 순환하는 비율의 증가, 유역에서 바로 유출되는 직접유출의 비율의 감소 시 높게 산정된다. 강우량이 적었을 때 강우량의 대부분을 증발산량으로 소비하고, 유출량이 감소하여 물순환이 좋은 것으로 평가되었으며, 강우량이 많았을 때 강우량의 대부분이 유역 밖으로 유출되기 때문에 낮은 물순환율로 평가되었다.

나. Budyko curve framework

자연 상태를 가정한 Scenario B에서 모의된 증발산량 자료 및 기상자료를 이용해 매개변수 w 를 진위곡 유역에 대하여 도출하였으며, 최적 w 는 2.17로 결정되었다. 이를 통해 구한 Budyko 곡선은 식 (3)과 같으며, Fig. 7은 도출한 매개변수를 활용한 Budyko 곡선과 연도별 값을 표시한 것이다.

Table 4 Evaluation of agricultural water circulation rate in Jinwi watershed

Year	Precipitation (mm)	Scenario					
		A		B		C	
		Direct runoff (mm)	AWCR (%)	Direct runoff (mm)	AWCR (%)	Direct runoff (mm)	AWCR (%)
2002	1381.0	312.7	77.4	293.7	78.7	313.7	77.3
2003	1387.0	249.4	82.0	223.4	83.9	246.5	82.2
2004	1332.0	238.2	82.1	229.5	82.8	249.2	81.3
2005	1264.5	204.8	83.8	196.3	84.5	218.4	82.7
2006	1308.0	347.6	73.4	324.1	75.2	340.8	73.9
2007	1383.5	234.9	83.0	208.5	84.9	231.2	83.3
2008	1104.0	186.5	83.1	200.0	81.9	216.2	80.4
2009	1224.5	199.0	83.7	208.0	83.0	229.0	81.3
2010	1567.0	320.0	79.6	299.7	80.9	321.4	79.5
2011	1975.5	564.9	71.4	596.6	69.8	623.0	68.5
2012	1466.5	262.8	82.1	258.6	82.4	282.9	80.7
2013	1265.0	207.8	83.6	194.5	84.6	213.5	83.1
2014	882.0	86.4	90.2	78.4	91.1	91.8	89.6
2015	834.5	65.6	92.1	82.5	90.1	94.3	88.7
2016	832.5	60.0	92.8	56.2	93.2	67.8	91.9
2017	1131.5	226.9	80.0	223.1	80.3	242.8	78.5
2018	1230.5	146.1	88.1	136.1	88.9	156.1	87.3
Average	1268.8	217.6	82.9	211.8	83.3	231.2	81.8

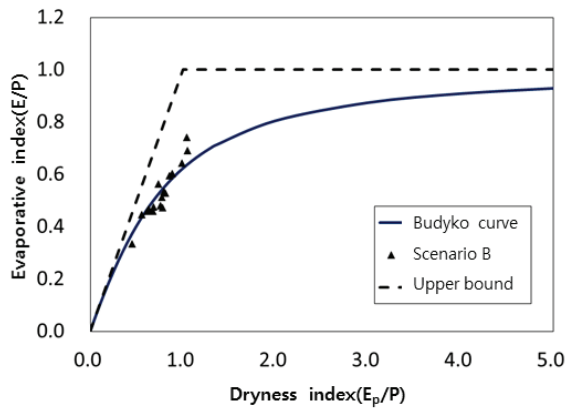


Fig. 7 The evolution of Budyko curve construction

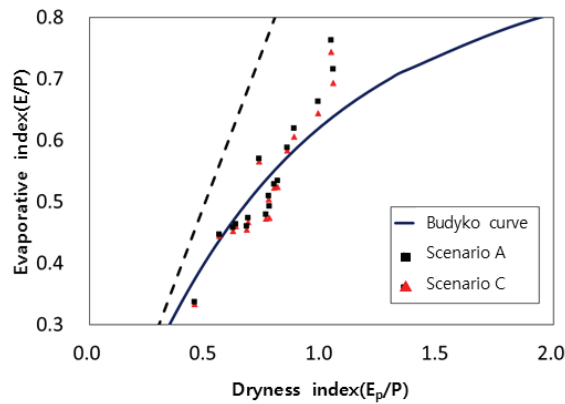


Fig. 8 Comparison of the results of the Budyko curve by scenarios

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_p}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_p}{P} \right)^{2.17} \right]^{\frac{1}{2.17}} \quad (3)$$

Fig. 8은 구축한 Budyko 곡선에 시나리오 A, C의 연도별 값을 도시하였다. Scenario A가 Scenario C보다 높은 값을 나타냈으며, 이는 농업용수의 충분한 공급으로 인한 증발산량 증가와 저수지 저류에 따른 수면 증발량에 따른 것으로 사료된다.

Dryness index가 높은 경우에는 Evaporative index의 차이가 더 크게 나타나는 경향을 보였다. 강우량이 적은 연도에서 Dryness index는 강우량이 적은 연도에서 높게 나오는 경향을 보이는데 이에 저수지를 통해 상류 유역에서 발생한 유출 대부분을 농업용수로 전환해 작물 생육에 사용했기 때문으로 사료된다.

3. 농업용 저수지 물순환 기여도 분석

Fig. 3과 같이 시나리오별 물순환 차이 분석을 통해 토지이용변화 및 저수지 건설에 따른 영향을 평가하였다. 시나리오별 농업유역 물순환을 차이를 분석한 결과는 Table 5와 같다. 토지이용변화 및 저수지 건설로 인해 평균 0.5%의 물순환율이 감소, 5.8 mm의 직접유출량이 증가했다. 그 중 토지이용변화로 물순환율이 1.5%의 감소, 직접유출량이 19.4 mm의 증가를 했으나, 저수지 건설로 물순환율이 1.1% 증가, 직접유출량

Table 5 Assessment of contribution to water circulation of agricultural reservoir by agricultural water circulation rate

Year	Precipitation (mm)	Reservoir and landuse change effect		Landuse change effect		Reservoir effect	
		Direct runoff (mm)	AWCR (%)	Direct runoff (mm)	AWCR (%)	Direct runoff (mm)	AWCR (%)
2002	1381.0	19.0	-1.4	20.0	-1.5	-1.0	0.1
2003	1387.0	26.0	-1.9	23.1	-1.7	2.9	-0.2
2004	1332.0	8.7	-0.7	19.7	-1.5	-11.0	0.8
2005	1264.5	8.5	-0.7	22.1	-1.8	-13.6	1.1
2006	1308.0	23.5	-1.8	16.7	-1.3	6.8	-0.5
2007	1383.5	26.4	-1.9	22.7	-1.6	3.7	-0.3
2008	1104.0	-13.6	1.2	16.2	-1.5	-29.7	2.7
2009	1224.5	-8.9	0.7	21.0	-1.7	-29.9	2.4
2010	1567.0	20.3	-1.3	21.7	-1.4	-1.4	0.1
2011	1975.5	-31.8	1.6	26.3	-1.3	-58.1	2.9
2012	1466.5	4.3	-0.3	24.3	-1.7	-20.1	1.4
2013	1265.0	13.2	-1.0	19.0	-1.5	-5.7	0.5
2014	882.0	8.0	-0.9	13.4	-1.5	-5.4	0.6
2015	834.5	-17.0	2.0	11.8	-1.4	-28.7	3.4
2016	832.5	3.7	-0.4	11.5	-1.4	-7.8	0.9
2017	1131.5	3.8	-0.3	19.8	-1.7	-16.0	1.4
2018	1230.5	10.0	-0.8	20.1	-1.6	-10.0	0.8
Average	1268.8	5.8	-0.5	19.4	-1.5	-13.6	1.1

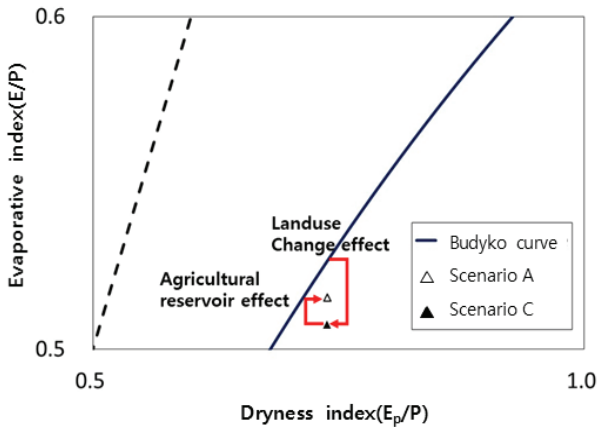


Fig. 9 Assessment of contribution to water circulation of agricultural reservoir by Budyko framework

이 13.6 mm의 감소하였다. 이는 토지이용변화로 인한 물순환 왜곡을 농업용 저수지의 저류와 농업용수 공급을 통해 회복한 것으로 사료된다.

구축한 Budyko 곡선을 통해 토지이용변화 및 저수지 건설에 따른 물순환 변화를 분석한 결과는 Fig. 9와 같다. 모의기간 전체에 대한 평균 강우량 및 잠재증발산량, 유출량을 통해 평가한 결과 Budyko 곡선에서의 동일 건조지수 (0.74)에서 증발지수는 0.53으로 나타나지만, Scenario C에서의 증발지수는 0.51, Scenario A에서는 0.52로 나타났다. 이는 저수지 건설로 인해 수면증발량이 증가하고 관개지구의 충분한 용수공급으로 인해 증발산량은 일부 증가하였으나, 전체 유역면적 대비 수면과 관개지구의 면적이 크지않을 뿐만 아니라 시가지 지역 증가에 대비하여 초지의 증가로 인해 효과는 크지않은 것으로 사료된다. 본 연구에서 나타난 토지이용변화에 따른 증발산량 감소와 Budyko곡선의 기후변화에 따른 증발산량 증가는 기존 기후변화, 토지이용변화에 따른 유역 물수지 변화를 연구한 Park (2009)에서 제시한 결과와 유사한 것으로 사료된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 농업용 저수지 및 토지이용변화가 유역 물순환에 미치는 영향을 평가하였다. 대상유역은 농업용 저수지 및 관개지구가 있는 진위교 유역으로 선정하였으며, 유역 모델인 HSPF와 저수지 및 관개지구 모의가 가능한 MASA를 연계하여 모델링하였다. 연계모델을 보·검정한 결과 상류 R² 0.74 NSE 0.74 저수지 수위 R² 0.76, 하류 R² 0.78, NSE 0.71로 적용성을 확인하였다.

농업용 저수지와 토지이용변화의 효과를 평가하기위해 현

재상태에서 저수지가 없는 것을 가정한 시나리오와 저수지 건설이전 토지이용을 활용한 시나리오를 추가적으로 구성하고 시나리오 별 물순환 차이를 분석하였다. 농업유역물순환을 통해 평가한 결과 현재의 물순환은 저수지 건설 이전보다 0.5%가 감소하였으며 토지이용변화로 1.5% 감소, 저수지 건설로 1.0% 증가하였다. 이는 불투수면 증가 및 농경지 감소로 직접유출량이 증가하였으나 농업용 저수지의 상류유역 직접유출을 저류하고, 이를 용수공급에 활용한 효과로 사료된다. Budyko곡선을 통한 평가에서는 증발지수 0.01이 감소하였으며 토지이용변화로 0.02 감소, 저수지 건설로 0.01 증가하였다. 저수지 건설로 인해 수면증발량이 증가하고 관개지구의 충분한 용수공급으로 인해 증발산량은 일부 증가하였으나, 전체 유역면적 대비 수면과 관개지구의 면적이 적어 효과는 크지않은 것으로 사료된다.

본 연구에서 평가한 농업용 저수지가 유역 물순환 개선에 기여하는 바는 상류유역 유출을 농업용수로 전환해 유출량을 유역에서 다시 이용하게 하고, 수면과 관개지구에서 증발산량과 침투량을 증가시키는 것으로 나타났다. 이는 유역단위 물순환 개선에 농업용 저수지가 물순환 개선 시설의 역할을 할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 추후 기후변화 및 토지이용변화에 따른 물순환 변화에서 농업용 저수지로 인한 변화도 추가적으로 살펴볼 필요가 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1A2C2003808).

REFERENCES

1. Budyko, M. I., 1974. *Climate and Life*. New York, New York: Academic Press.
2. Cho, Y. H., S. Y. Park, J. M. Na, T. W. Kim, and J. H. Lee, 2019. Hydrological and Ecological alteration of river dynamics due to multipurpose dams. *Journal of Wetlands Research* 21(s-1): 16-27 (in Korean). doi:10.17663/JWR.2019.21.s-1.16.
3. Chung, I. M., S. H. Hong, J. W. Lee, and M. G. Kim, 2017. Present status and future improvements in groundwater use near streams in the anseongcheon watershed, Korea. *The Journal of Engineering Geology* 27(4): 383-392 (in Korean). doi:10.9720/kseg.2017.4.383.

4. 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 Symposium*, 2114-2117 (in Korean).
5. Eckhardt, K., 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes* 19(2): 507-515. doi:10.1002/hyp.5675.
6. Environmental Geographic Information Service, Landuse data. <https://egis.me.go.kr/main.do> Accessed 5 Oct 2020.
7. Fu, B. P. 1981. On the calculation of the evaporation from land surface. *Sci. Atmos* 5: 23-31.
8. Hwang, S. H., M. S. Kang, J. H. Kim, J. H. Song, S. M. Jun, S. H. Lee, and J. Y. Choi, 2012. Assessment of flood impact on downstream of reservoir group at hwangryong river watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(3): 103-111 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2012.54.3.103.
9. Im, S. J., 2000. Modeling irrigation return flow from paddy fields on agricultural watershed. Ph.D. diss., Seoul National University (in Korean).
10. Eekhout, J. P., C. Boix-Fayos, P. Perez-Cutillas, and J. de Vente, 2020. The impact of reservoir construction and changes in land use and climate on ecosystem services in a large Mediterranean catchment. *Journal of Hydrology* 590. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125208.
11. Kang, M. S., P. Srivastava, J. H. Song, J. H. Park, Y. G. Her, S. M. Kim, and I. H. Song, 2016. Development of a component-based modeling framework for agricultural water-resource management. *Water* 8(8): 351. doi:10.3390/w8080351.
12. Kim, B. K., B. S. Kim, and H. H. Kwon, 2009. Impact assessment of agricultural reservoir on streamflow simulation using semi-distributed hydrologic model. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 29(1B): 11-12 (in Korean).
13. Kim, H. K., M. S. Kang, E. J. Lee, and S. W. Park, 2011. Climate and land use changes impacts on hydrology in a rural small watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(6): 75-84 (in Korean). doi: 10.5389/KSAE.2011.53.6.075.
14. Kim, S. H., J. H. Song, S. H. Hwang, H. G. Kim, and M. S. Kang, 2020. Development of agricultural water circulation rate considering agricultural reservoir and irrigation district. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 62(2): 83-95 (in Korean). doi: 10.5389/KSAE.2020.62.2.083.
15. Korea Meteorological Administration, Domestic climate data. <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>. Accessed 15 Sep. 2020.
16. Lee, D. G., J. H. Song, J. H. Ryu, J. N. Lee, S. K. Choi, and M. S. Kang, 2018. Integrating the mechanisms of agricultural reservoir and paddy cultivation to the HSPF-MASA-CREAMS-PADDY system. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 60(6): 1-12 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2018.60.6.001.
17. Lee, J. W., N. W. Kim, I. M. Chung, and J. E. Lee, 2015. Effects of irrigation reservoirs and groundwater withdrawals on streamflow for the anseongcheon upper watershed. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 35(4): 835-844 (in Korean). doi:10.12652/Ksce.2015.35.4.0835.
18. Lee, J. N., and J. K. Noh, 2015. Evaluating future stream flow by operation of agricultural reservoir group considering the RCP 8.5 climate change scenario. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(5): 113-122 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2015.57.5.113.
19. Lee, Y. J., M. J. Park, K. W. Park, and S. J. Kim, 2008. Analysis of hydrologic behavior including agricultural reservoir operation using SWAT model. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 28(6B): 653-663 (in Korean).
20. Park, J. C., 2009. Prediction of the impact of environmental change on water balance in the catchment of guryang stream. *Journal of the Korean Geomorphological Association* 16(3): 113-126 (in Korean).
21. Rural agricultural water resource information system, Water level data.. <https://rawris.ekr.or.kr/main.do> Accessed 11 Nov. 2018.
22. Song, J. H., Y. G. Her, M. S. Jun, S. H. Hwang, J. H. Park, and M. S. Kang, 2019. Lessons from assessing uncertainty in agricultural water supply estimation for sustainable rice production. *Agronomy* 9(10): 662. doi: 10.3390/agronomy9100662.
23. Song, J. H., 2017. Hydrologic analysis system with multi-objective optimization for agricultural watersheds. Ph.D. diss., Seoul National University (in Korean).
24. Song, J. H., I. H. Song, J. T. Kim, and M. S. Kang, 2015a. Simulation of agricultural water supply considering yearly variation of irrigation efficiency. *Journal of Korea Water Resources Association* 48(6): 425-438 (in Korean). doi:

10.3741/JKWRA.2015.48.6.425.

25. Song, J. H., I. H. Song, J. T. Kim, and M. S. Kang, 2015b. Characteristics of irrigation return flow in a reservoir irrigated district. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 11(1): 20-30 (in Korean).
26. Song, J. H., M. S. Kang, I. H. Song, S. H. Hwang, J. H.

Park, and J. H. Ahn, 2013. Surface drainage simulation model for irrigation districts composed of paddy and protected cultivation. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(3): 63-73 (in Korean). doi: 10.5389/KSAE.2013.55.3.063.