

수로 네트워크 모델링 기반 농촌용수 물순환 해석

Assessment of Water Cycle in Agricultural Watershed Based on Canal Network Modeling

김하영* · 남원호** · 문영식*** · 신지현**** · 양미혜*****

Kim, Ha-Young* , Nam, Won-Ho** , Mun, Young-Sik*** , Shin, Ji-Hyeon**** , and Yang, Mi-Hye*****

Abstract

Recently, various factors such as climate change, watershed environment change, and, socio-economic change, have been shown to have a major impact on the hydrological water cycle and on available water resources in agricultural watersheds. Therefore, it is necessary to identify the water cycle elements of watersheds accurately and to quantify them objectively. Agricultural watersheds can be divided into the basin, irrigation facilities such as reservoir and pumping stations, irrigation areas, and water cycle elements such as rainfall and evapotranspiration water supply and demand. A systematic management system of agricultural water cycle should be established through element analysis, module development, and modeling techniques for comprehensive interpretation of agricultural watersheds. This study involved the monitoring and modeling of inlet, outlet, and reservoir to analyze and quantify water cycle elements in the Madun reservoir (located in Anseong, Gyeonggi-do) and Heungeop reservoir (located in Wonju, Gangwon-do). The watershed runoff, water supply and drainage of irrigation canal, and return flow were estimated using the Storm Water Management Model (SWMM) based on analysis of canal networks and hydraulic calculations. These results can be utilized to ensure stable supply of agricultural water resources and to inform water management policies.

Key words : Agricultural Water, Storm Water Management Model (SWMM), return Return Flow Rate, Water Cycle, Water Supply and Demand

요 지

기후변화, 유역환경변화, 사회·경제적 변화 등과 같은 다양한 요인으로 농촌유역 환경이 변화하고 있다. 지속가능하고 건전한 물순환을 위해 지역의 물순환 요소를 정확히 파악하고, 객관적인 정량화가 선행되어야 한다. 농촌유역은 단일 유역의 경우 상류부 유역, 저수지 제체, 하류부 관개 지역으로 구분할 수 있으며, 강우량, 유출량, 증발산량, 공급량, 수요량, 회귀수량 등 물순환이 복합적으로 연계되어 있다. 따라서 농촌용수 물순환 해석을 위해서는 농촌용수를 구성하는 요소별 해석, 모델링 및 모니터링 기법을 활용해야 한다. 본 연구에서는 농촌용수 요소별 물순환 분석 및 정량화를 위하여 경기도 안성시의 마둔저수지와 강원도 원주시에 위치한 흥업저수지를 대상으로 농업유역, 저수지의 시점부 수로, 말단부 수혜면적을 구분하여 용배수로를 통한 물공급 및 용수 배분을 모니터링 하였다. 또한 용배수로의 물공급 및 분배 모델링을 위하여 네트워크 요소의 수리학적 연산을 수행할 수 있는 SWMM (Storm Water Management Model) 모델링을 활용함으로써 유역 유출량, 수로부 공급량 및 배수량, 회귀수량을 추정하였다. 본 연구 결과, 시공간적으로 상세화된 농촌유역 물순환 해석을 기초 모형을 구축하였으며, 향후 농촌수자원의 안정적인 공급과 농촌용수 물관리 정책에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 농업용수, SWMM 모델, 회귀수량, 물순환, 공급량 및 수요량

*정회원, 환경대학교 사회안전시스템공학부 석사과정(E-mail: hayoung.kim@hknu.ac.kr)

Member, Master's Course, School of Social Safety and Systems Engineering, Hankyong National University

**교신저자, 정회원, 환경대학교 사회안전시스템공학부 부교수(Tel: +82-31-670-5137, Fax: +82-31-670-5139, E-mail: wonho.nam@hknu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, School of Social Safety and Systems Engineering, Institute of Agricultural Environmental Science, National Agricultural Water Research Center, Hankyong National University

***정회원, 환경대학교 국가농업용수연구센터 연구원(E-mail: youngsik.mun@hknu.ac.kr)

Member, Researcher, National Agricultural Water Research Center, Hankyong National University

****정회원, 환경대학교 사회안전시스템공학부 석사과정(E-mail: jihyeon.shin@hknu.ac.kr)

Member, Master's Course, School of Social Safety and System Engineering, Hankyong National University

*****정회원, 환경대학교 융합시스템공학과 박사과정(E-mail: mihye.yang@hknu.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Convergence of Information and Communication Engineering, Hankyong National University

1. 서론

농촌유역의 통합물관리 실현을 위해서는 물순환을 구성하는 다양한 모의 요소들을 하나의 객체로 모듈화하여 농촌유역의 복잡성을 해석해야 한다(Park et al., 2015). 농업유역 물순환 과정은 지역 조건에 따라 다르게 나타나며, 농촌용수의 물순환 과정을 정립하기 위해서는 농업유역 저수지 유역의 유출량, 농업용수 공급량 및 수요량 등 모의 요소 정립이 필요하다(B.S. Kim et al., 2020). 또한, 전지구적 기후변화, 과도한 지하수 사용 등으로 유역 환경이 변화하고 있으며, 하천의 건천화, 지표유출량 증가, 증발산량 감소 등 물순환 구조가 왜곡되고 있다(Kim et al., 2011; Chung et al., 2017; Zhang et al., 2019; Koutsoyiannis, 2020).

복잡한 농업유역의 물순환을 정량적으로 해석하기 위해서는 다양한 모의 요소를 모듈화하여 수리수문학적 해석 모형을 적용하는 방법이 선행되고 있다. Park et al. (2015)는 농촌유역 물순환 해석을 위해 웹기반 자료 전처리 및 모형 연계 기법을 개발하였다. Kang et al. (2016)은 농촌용수 물순환 해석을 위한 컴포넌트 기반 모델링 프레임워크인 COmponent-based Modeling Framework for Agricultural water-Resources Management (COMFARM)의 시스템을 개발하였으며, 농업유역 물순환 모델링을 수행하였다. Song (2017)은 농업유역 수문해석 시스템 Module-based hydrologic Analysis System for Agricultural watersheds (MASA)를 이동저수지 유역에 적용하여 분석하였으며, 실측값으로 검증하였다.

물순환 건전성 회복을 위한 평가 방법으로 물순환 지표가 제시된 바 있다(Jung and Oh, 2013; Youcan et al., 2016; S.H. Kim et al., 2020). 하지만, 단순히 성분 및 지표만 제시하는 것은 장기적 물순환 구조의 변동을 파악하는데 한계점이 있으며, 물순환을 개념을 이용한 수문순환 해석이 필요하다(Kwak et al., 2020). 환경부(물환경보전법 제 53조의 5제 2항)에서는 물순환율을 총 강우량 대비 빗물이 침투, 저류 및 증발산 되는 비율로 정의하였으며, 직접유출을 기반의 물순환율을 제시하였다.

농업용수는 논벼 작물 재배를 위한 관개용수로서 수요량, 공급량, 사용량 등으로 구성되어 있다. 농업용수 물순환 기작에서 관개용수는 용배수로를 통해 공급되는 공급량으로부터 논에서 사용되는 증발산량, 침투량, 자연적 및 인위적인 배수량으로 소비된다(Choi and Choi, 2002; Nam et al., 2013). 또한, 농업용수 공급량에서 농경지에 공급된 수량

중 증발산에 의해 소비되지 않고 배수 또는 심층 침투를 통해 하천으로 회귀하는 수량을 회귀수량(return flow)이라고 한다(Im, 2000; Park and Kim, 2016). 관개회귀수량 추정은 유역의 용수공급계획, 하천유황의 예측, 관개용수의 사용량 결정, 하천수질 관리 및 농업유역의 수문모델링 등 중요한 인자로 작용한다(Kim et al., 2010).

본 연구에서는 농업유역 물순환 관개지구 구성요소 정립을 위해 주로 도시 지역의 유출량 및 수질에 대한 단일 및 장기 모의가 가능한 EPA Storm Water Management Model (SWMM)을 활용하였다. 최근에는 농촌유역의 수원공, 관개수로 및 포장으로 구성된 농업 수자원 관개 모형을 구축함으로써 관개수로 내 수리수문해석 및 들녘단위의 물수지 모의를 통해 공급량 및 관개용수량을 산정하고 있다(Nam et al., 2016; Park, 2017; Bang, 2019; Shin, Nam, Bang, Kim, An, Do et al., 2020). Kang (2015)은 농업용수의 관개기술개발을 위해 SWMM 모형 기반으로 네트워크를 구축하여 수리해석을 통해 수로 내 수위변화, 흐름 등을 분석하였으며, Shin, Nam, Bang, Kim, An, and Lee (2020)는 SWMM 분석을 통해 농업용수 관개효율 및 용수공급 취약성 평가를 수행하였다.

본 연구에서는 농업유역 및 수원공 단위의 회귀율을 추정하기 위해 모니터링과 수로 네트워크 기반 SWMM 모형을 활용하여 공급량, 배수량, 관개량 등을 산정하였으며, 농업용수 물순환 해석을 수행하였다.

2. 연구방법

2.1 대상저수지 선정

본 연구에서는 경기도 안성시의 마둔저수지, 강원도 원주시에 위치한 흥업저수지 대상으로 농업용수 회귀율 및 물순환을 추정을 수행하였으며, 대상저수지의 저수지 체원은 Table 1과 같다. 마둔저수지의 농업용수 공급을 위한 용수로는 1개의 간선과, 5개의 지선, 13개의 지거로 구성되어 있으며, 유역배율은 2.4이다. 기상자료는 기상청 종관기상관측소 (Automated Synoptic Observing System, ASOS) 천안기상대 자료를 이용하였다.

흥업저수지의 경우 수로조각이 분리되어있어 유역 단위의 시점부와 말단부 수로를 대상으로 모니터링 측정이 용이한 지구이다. 6개의 간선과 27개의 지선 17개의 배수 간선으로 구성되어 있으며, 유역배율은 10.0 이상이다. 기상자료는 ASOS 원주기상대의 자료를 활용하였다. 대상저수지의 저

Table 1. Description of the Agricultural Reservoir in Mardun and Heungeop Reservoir

Reservoir name	Construction year (year)	Irrigation area (ha)	Watershed area (ha)	Effective reservoir Storage (10 ³ m ³)
Mardun	1975	520	1240	4,707
Heungeop	1962	165	1750	1,098

수출 자료는 농촌용수종합정보시스템(Rural Agricultural Water Resource Information System, RAWRIS), 농업기반시설관리시스템(Rural Infrastructure Management System, RIMS)의 자료를 수집하여 구축하였으며, 구축가능한 자료 기간에 따라 마둔저수지는 2010년부터 2019년까지, 홍업저수지는 2017년부터 2019년까지 자료를 활용하였다.

2.2 농업용수 회귀수량 정의

농업용수 회귀율의 경우, 과거 연구에서는 자료 모니터링 가능여부에 따라 대부분 소규모 필지단위의 회귀율 추정 연구가 수행되었다. 대상지역의 유형은 경지정리가 되어있고, 용수로와 배수로 조적이 단순하여 안정적인 관개량 및 배수량 측정이 가능한 지역, 영농방식과 물관리 방법이 동일한 지역, 외부유역으로부터 지표수 유입이나 지하수 용출이 없는 시험지구를 기준으로 수행되었다.

농업용수 회귀수량은 관개시기에 공급되는 관개용수 작물에 의해 소비되지 않고 하천으로 유입하는 수량을 의미하며, 신속회귀수량과 지연회귀수량으로 구성된다. 신속회귀수량은 물꼬를 넘어 월류하여 비교적 단기간에 하천으로 유입되는 지표배수량이며, 지연회귀수량은 심층 침투하여 장기간 하류 하천으로 회귀하는 수량을 의미한다(Lee, 2007). 농업용수 회귀율은 Eq. (1)과 같다.

$$R_f = R_1 + R_2 = \frac{D_2}{D_1} + \frac{P}{D_1} \quad (1)$$

여기서, R_f 는 회귀율, R_1 과 R_2 는 신속회귀율과 지연회귀율이며, D_1 는 관개용수량, D_2 는 지표배수량, P 는 심층 침투량이다.

본 연구에서는 심층 침투하는 지연회귀수량을 추정하기 위하여 대상저수지의 물수지 분석을 수행하였다. 물관리가 안정화된 논 유역의 물수지는 Eq. (2)와 같다. ($G_1 - G_2$)를 논외 침투량 중에서 관개지구 내 배수로나 하천 등으로 유출되지 않은 심층침투량 P 로 정의하였으며, 장시간 동안 강우가 없으면 강수량 R 은 0이고 저류량이 일정하므로 Eq. (3)의 물수지 식으로 산정하였다(Choi and Choi, 2002; Choo, 2004; Chung and Park, 2004).

$$D_1 - D_2 = ET - R + (G_2 - G_1) + \Delta S \quad (2)$$

$$D_1 - D_2 - ET = P \quad (3)$$

여기서, R 은 강수량, ET 는 증발산량, G_1 는 지하수 유입량, G_2 는 지하수 유출량, D_1 , D_2 는 지표수 유입량과 유출량, ΔS 는 저류량의 변화, P 는 심층침투량이다.

본 연구에서는 단일 수원공 단위의 농촌유역 회귀율을 산정하였으며, 지표배수량을 신속 회귀수량, 물순환을 통한 심층 침투량을 지연회귀수량으로 정의하여 추정하였다.

2.3 농업유역 물순환을 정의

본 연구에서는 환경부의 물환경보전법에서 제시한 직접 유출량 기반의 물순환을 산정식을 사용하였다(Eq. (4)).

$$\text{물순환율 (\%)} = \left(1 - \frac{\text{direct runoff}}{\text{precipitation}}\right) \times 100 \quad (4)$$

물순환을 추정하기 위하여 저수지 유출량 모의를 수행하였으며, 저수지 유출량 산정은 유역을 여러 개의 저류형 탱크로 가정하여 강우-유출 과정을 모형화한 수문모형인 3단 TANK 모형을 활용하였다(Sugawara, 1995).

직접유출 및 기저유출 분리 방법은 디지털 필터링(Recursive Digital Filtering, RDF) 방법을 활용하여 총 유출량으로부터 기저유출량을 분리하였으며, RDF 방법의 기저 유출 산정은 Eq. (5)와 같다(Lim et al., 2010).

$$b_k = \frac{(1 - BFI_{\max})ab_{k-1} + (1 - a)BFI_{\max}y_k}{1 - aBFI_{\max}} \quad (5)$$

여기서, y 는 총유출량, b 는 기저유출량, f 는 직접유출량, k 는 시간 간격을 의미하며, BFI_{\max} 는 Baseflow Index, a 는 필터 매개변수이다.

본 연구에서는 변수를 최소화하기 위하여 모형의 기본값인 BFI_{\max} 는 0.80, Filter parameter는 0.98을 사용하였다.

2.4 SWMM 모형

농업용 저수지에서의 공급량, 용배수로를 통한 관개량, 유말공의 배수량 모의를 위해 1971년 미국 환경청(US EPA, Environmental Protection Agency)에서 개발된 EPA-SWMM을 활용하였다. SWMM 모형은 단일 강우 현상 및 연속 모의가 가능하다는 장점이 있으며, 최소의 보정으로 비교적 정확한 유출량 산정이 가능한 모델이다(Lee and Choi, 2015). 또한 개수로, 관수로, 저수조, 펌프, 오리피스, 위어 등 수로 네트워크의 수리학적모의를 수행할 수 있으므로 개수로 중심의 농업용수 공급 시뮬레이션이 가능하고(Kim et al., 2016), 용배수로의 월류 배수효과, 압력흐름, 지표면 저류 등 수리현상 및 관로 내 수질 변화의 모의를 동시에 수행할 수 있다(Rossman, 2010). 마둔저수지와 홍업저수지 대상지구에 구축된 SWMM 모형의 용수계통도는 Figs. 1, 2와 같다.

본 연구에서는 모형의 적용성 평가를 위해 결정계수(R^2), 효율성 지수(Nash and Sutcliffe Efficiency, NSE; Nash and Sutcliffe, 1970)를 사용하였다. 모델의 평가를 위해 사용된 공식은 Eqs. (6), (7)과 같으며, Table 2는 평가 기준이다(Kwak et al., 2020).

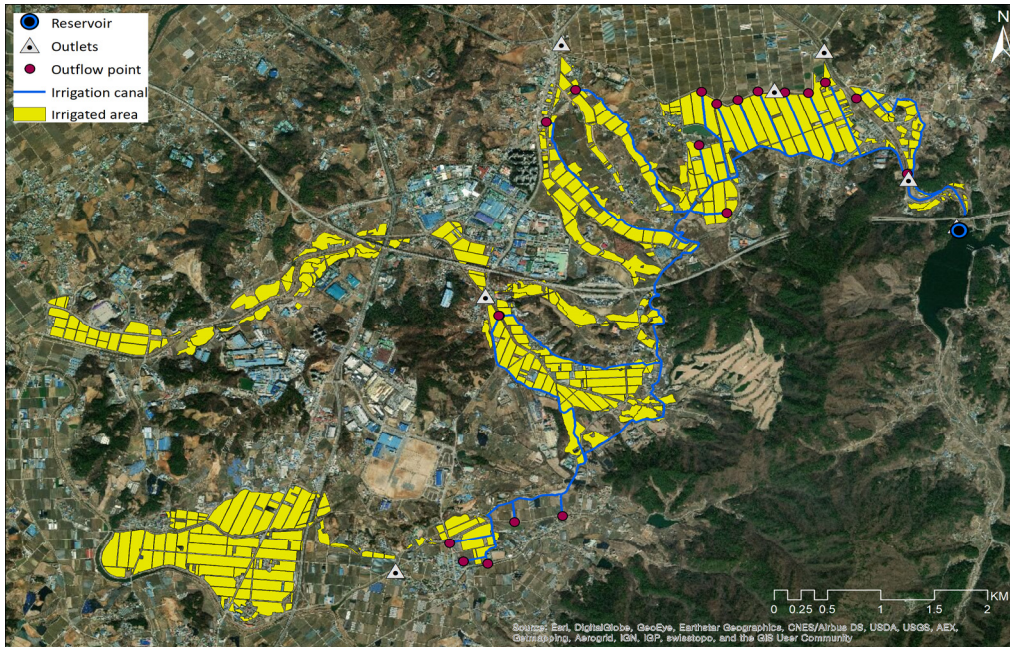


Fig. 1. Location of the Agricultural Reservoir and Irrigation Canal Networks in Madun Reservoir

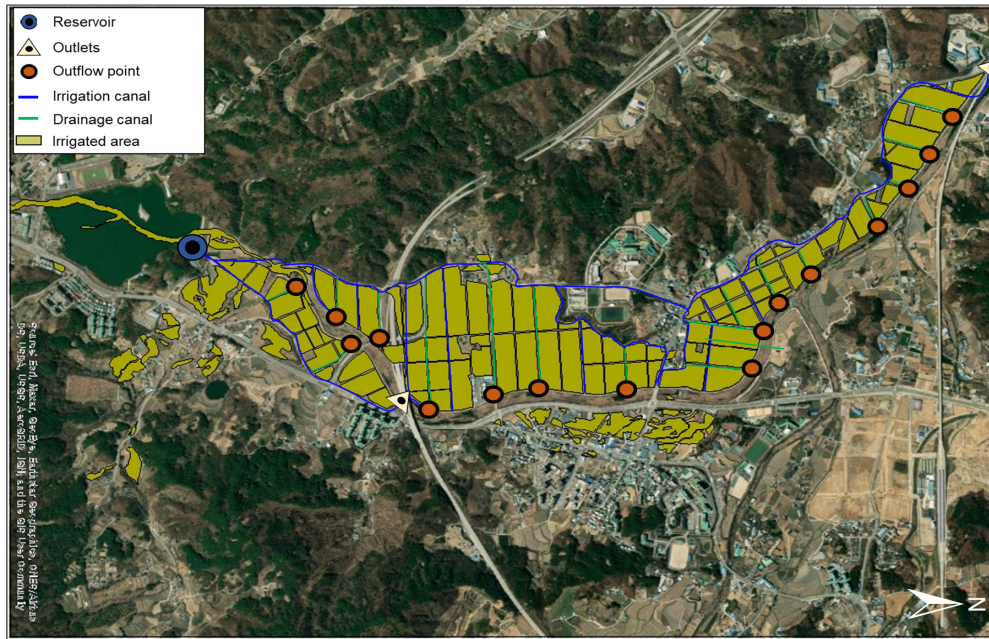


Fig. 2. Location of the Agricultural Reservoir and Irrigation Canal Networks in Heungeop Reservoir

Table 2. Evaluation Criteria for Hydrological Models (Moriassi et al., 2015)

Statistic	Very good	Good
R^2	$R^2 > 0.85$	$0.75 < R^2 \leq 0.85$
NSE	$NSE > 0.80$	$0.70 < NSE \leq 0.80$
Statistic	Satisfactory	Not satisfactory
R^2	$0.60 < R^2 \leq 0.75$	$R^2 \leq 0.60$
NSE	$0.50 < NSE \leq 0.70$	$NSE \leq 0.50$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (6)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

여기서, O 는 실측값, P 는 모의값, \bar{O} 는 실측값의 평균, \bar{P} 는 모의값의 평균이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 농업유역 공급량 모니터링

대상지구의 회귀율 및 물순환율을 분석하기 위하여 강수량, 유출량, 저수지 공급량, 시점부 공급량 모니터링 자료 등 기초자료를 구축하였으며, 1991년부터 2019년까지 약 30년간 데이터를 정리하였다. 마둔저수지는 RIMS에서 제공하는 자료를 이용하였으며, 홍업저수지는 1991년부터 2007년까지는 RIMS 자료, 2008년 이후에는 자동수위측정자료를 이용하였다. 마둔저수지는 2011년 강수량이 1,874 mm

이며, 홍업저수지는 2018년 강수량이 1,074 mm로 가장 많이 발생하였다. 저수지 유입량은 수정 3단 TANK 모형을 이용하여 유출량을 산정하였다. 마둔저수지는 2010년부터 2019년까지, 홍업저수지는 2017년부터 2019년까지 모니터링 결과는 Tables 3, 4와 같다.

3.2 SWMM 모의

3.2.1 모형의 검증

대상지구의 공급량 자료와 저수율 자료, 기상자료 바탕으로 SWMM 모의를 수행하였다. 대상저수지의 용수계통도 기반으로 용수로와 배수로를 분리하였으며, 배수로를 통해 하천으로 배수되는 유말공의 위치를 파악하여 적용하였다.

저수율 기반 공급량과 실측 공급량 자료를 입력자료로 활용하였으며, 배수량의 경우 SWMM 모델링을 통한 시점부 공급에 따른 유말공의 배수 분석을 수행하였다. 수로 네트워크 분석의 모의 조건은 수문 개도율을 적용하여 목표 담수심 (ponding depth)을 도달하면 용수공급을 중단하도록 설정하였다.

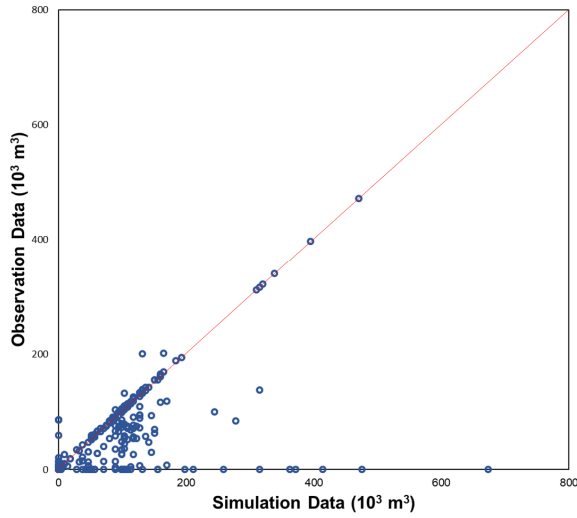
SWMM 모의 기반 공급량과 실측 공급량을 비교 분석하였으며, 분석 결과는 Figs. 3, 4와 같다. 전체기간 2010년부터 2019년까지 마둔저수지 검증결과 R^2 은 0.73, NSE는 0.71로 나타났으며, 2017년부터 2019년까지 홍업저수지 검증 결과는 R^2 0.74, NSE는 0.74로 나타났다. 마둔저수지와 홍업저수지의 검증 결과 통계변량은 Table 5와 같다.

Table 3. Monitoring Data of Madun Reservoir

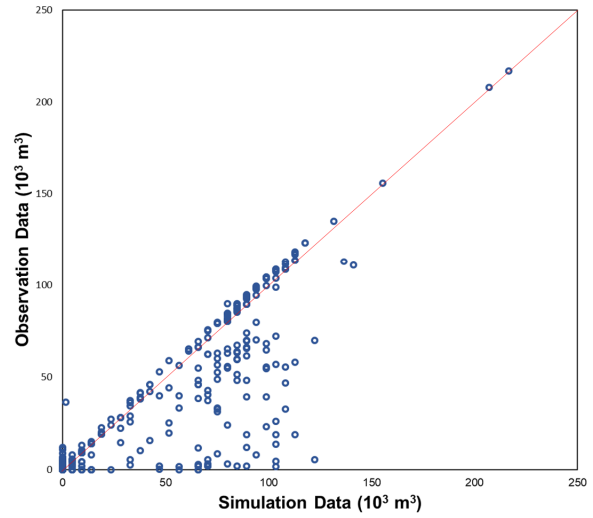
Year	Precipitation (mm)	Runoff (mm)	Runoff rate (%)	water supply (10^3 m^3)
2010	1,190	748	63	5,000
2011	1,874	1,268	68	11,271
2012	1,393	905	65	9,089
2013	1,171	723	62	6,293
2014	676	343	51	5,237
2015	581	290	50	5,821
2016	679	364	54	3,486
2017	910	540	59	3,318
2018	1,208	752	62	6,747
2019	817	463	57	4,774
AVG	1,050	640	59	6,104

Table 4. Monitoring Data of Heungeop Reservoir

Year	Precipitation (mm)	Runoff (mm)	Runoff rate (%)	water supply (10^3 m^3)
2017	953	629	66	2,390
2018	1,074	725	68	2,870
2019	615	360	59	4,010
AVG	881	571	64	3,090

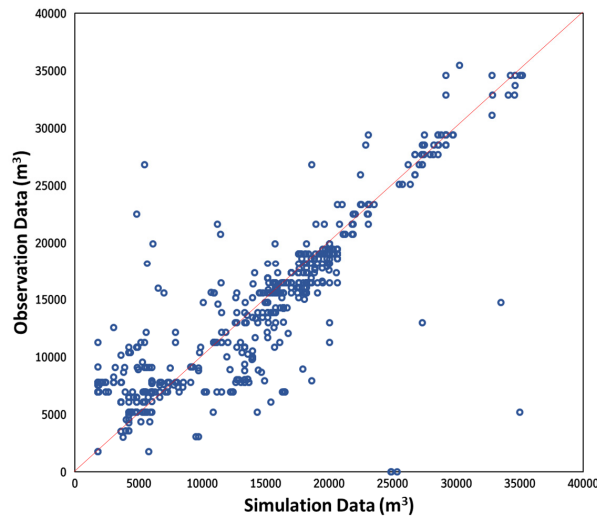


(a) SWMM result (2010-2014)



(b) SWMM result (2015-2019)

Fig. 3. Comparison of Observed and Simulated Water Supply in Madun



SWMM result (2017-2019)

Fig. 4. Comparison of Observed and Simulated Water Supply in Heungeop

Table 5. Simulation Statistics of SWMM Results in Madun and Heungeop Reservoir

Reservoir name	Period	R ²	NSE	Evaluation
Madun	2010-2019	0.71	0.73	Satisfactory
Heungeop	2017-2019	0.74	0.74	Satisfactory

3.2.2 모형의 결과

마둔저수지의 경우 2010년부터 2019년까지 관개기간(4월~9월)을 모의하였으며, 모의 결과 공급량의 연 최대값은 5,818,000 m³으로 2013년에 가장 많이 공급되었으며, 논으로

관개되는 관개량은 4,360,000 m³, 배수량은 1,457,000 m³으로 모의되었다. 심각한 가뭄이 발생했던 2017년은 3,524,000 m³으로 공급량이 가장 낮게 모의되었으며, 관개량은 3,252,000 m³, 배수량은 1,162,000 m³으로 나타났다.

홍업저수지의 경우 2017년부터 2019년까지 모의하였으며, 모의 결과 2019년 시점부 공급량 4,013,000 m³, 배수량 1,915,000 m³으로 가장 높게 산정되었다. SWMM 모형을 활용한 관개량 및 배수량 비율 분석 결과는 Figs. 5, 6과 같다.

3.3 농업용수 회귀율 추정

3.3.1 물수지 분석

SWMM 모의로 산정된 결과로부터 물수지 분석을 수행하였으며, 마둔저수지, 홍업저수지의 물수지 분석 결과는 Tables 6, 7과 같다. 마둔저수지의 2019년 관개총량은 2,718,700 m³,

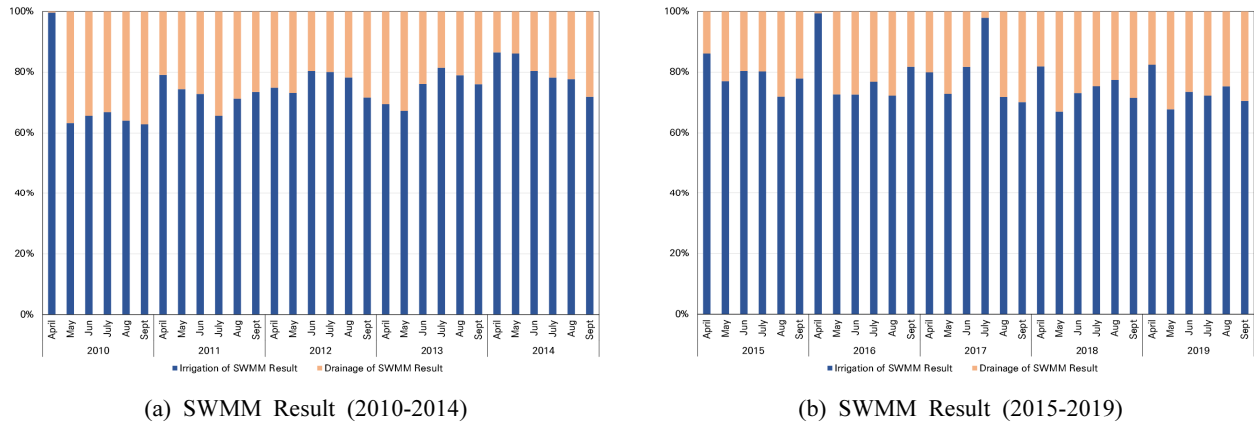


Fig. 5. Simulated Results of Irrigation and Drainage Water Using SWMM in Madun

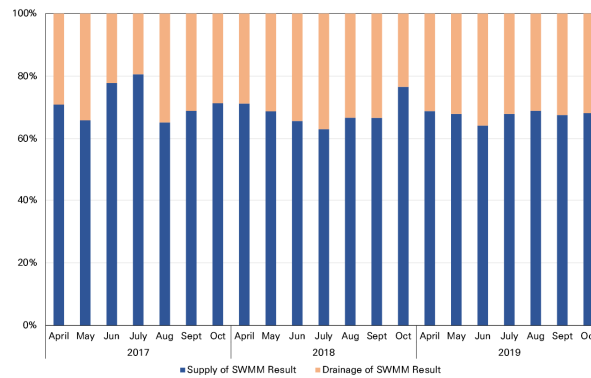


Fig. 6. Simulated Results of Irrigation and Drainage Water Using SWMM in Heungeop

Table 6. Analysis of Water Balance in Mardun

Year	Irrigation (D ₁)	Drainage (D ₂)	D ₁ -D ₂	Evapotranspiration (ET)	Infiltration
2010	3,350	1,834	1,516	1,542	211
2011	3,590	1,377	2,213	1,530	951
2012	3,924	1,232	2,693	1,681	1,133
2013	4,361	1,457	2,904	1,713	1,190
2014	3,708	1,023	2,686	1,689	995
2015	3,085	859	2,225	1,647	691
2016	2,826	994	1,832	1,655	397
2017	2,580	943	1,637	1,660	0
2018	3,252	1,162	2,090	1,819	479
2019	2,718	1,025	1,693	1,586	342
AVG	3,339	1,191	2,149	1,652	639

unit: 10³ m³

Table 7. Analysis of Water Balance in Heungeop

Year	Irrigation (D ₁)	Drainage (D ₂)	D ₁ -D ₂	Evapotranspiration (ET)	Infiltration
2017	2,388	1,055	1,333	1,043	430
2018	2,865	1,397	1,468	1,216	520
2019	4,013	1,914	2,098	1,124	1,096
AVG	3,089	1,455	1,633	1,128	682

unit: 10³ m³

Table 8. Results of Irrigation Return Flow in Madun

Year	Return flow rate (%)		
	Quick	Delay	Total
2010	54.8	6.3	61.1
2011	38.3	26.5	64.8
2012	31.4	28.9	60.3
2013	33.4	27.3	60.7
2014	27.6	26.8	54.4
2015	27.9	22.4	50.3
2016	35.2	14.1	49.3
2017	36.6	15.3	51.9
2018	35.7	14.7	50.4
2019	37.7	12.6	50.3
AVG	35.9	19.5	55.4

배수량 1,025,500 m³, 침침투량 342,700 m³, 증발산량 1,586,380 m³으로 나타났다. 2019년 홍업저수지 물수지분석 결과 시점부 공급량 4,013,000 m³, 배수량 1,914,000 m³, 침침투량 1,096,000 m³, 증발산량 1,124,000 m³으로 분석되었다.

3.3.2 회귀율 추정

SWMM 모의 결과와 물수지 분석 결과를 통해 회귀율을 산정하였으며, 신속회귀율은 하천으로 빨리 회귀하는 지표 배수량, 지연회귀율은 침침투량으로 정의하였다. 마둔저수지의 2010년부터 2019년까지 연별로 추정된 관개량, 배수량, 침투량, 회귀율 등 산정 결과는 Table 8과 같다. 연도별 회귀율 추정 결과 2011년이 64.8%로 가장 높은 회귀율이 산정되었으며, 2016년은 49.3%로 가장 낮은 회귀율이 나타났다. 10년간 회귀율 추정 결과 평균 회귀율은 55.3%로 산정되었다.

홍업저수지는 2017년부터 2019년까지 연도별 회귀율 분석을 수행하였으며, 연별로 추정된 관개량, 배수량, 침투량, 회귀율 등 결과는 Table 9와 같다. 연도별 회귀율 추정 결과 2017년 58.5%, 2018년 62.2%, 2019년 63.6%로 평균 61.4%의 회귀율이 산정되었다.

Table 9. Results of Irrigation Return Flow in Heungeop

Year	Return flow rate (%)		
	Quick	Delay	Total
2017	44.2	14.3	58.5
2018	48.8	13.4	62.2
2019	47.7	15.9	63.6
AVG	46.9	14.5	61.4

Table 10. Estimation of Water Cycle Rate in Madun Reservoir

Year	Precipitation (mm)	Direct runoff (mm)	Direct Runoff rate (%)	Water circulation rate (%)
2010	1,190	386	32.5	67.5
2011	1,874	647	34.5	65.5
2012	1,393	460	33.1	66.9
2013	1,171	398	34.1	65.9
2014	676	160	23.8	76.2
2015	581	157	27.1	72.8
2016	679	175	25.8	74.2
2017	910	264	29.1	70.9
2018	1,208	365	30.3	69.7
2019	817	230	28.2	71.8
AVG	1,050	324	29.9	70.1

3.4 물순환율 산정

Tables 10, 11은 유출량 모의값으로부터 직접유출과 간접유출을 구분하여 산정한 물순환율 결과이다. 마둔저수지의 직접유출 비율은 23.8~34.5%의 범위로 평균 29.9%로 나타났다. 물순환율은 65.5~76.2%의 범위로 평균 70.1%로 분석되었다. 홍업저수지의 경우 직접유출 비율은 31.5~37.8%의 범위이며, 물순환율은 62.2~68.5%의 범위로 나타났다. Fig. 7은 2019년 자료를 바탕으로 물순환 특성을 분석한 결과이다.

Table 11. Estimation of Water Cycle Rate in Heungeop Reservoir

Year	Precipitation (mm)	Direct runoff (mm)	Direct Runoff rate (%)	Water circulation rate (%)
2017	953	300	31.5	68.5
2018	1,074	406	37.8	62.2
2019	615	205	33.4	66.6
AVG	881	304	34.2	65.8

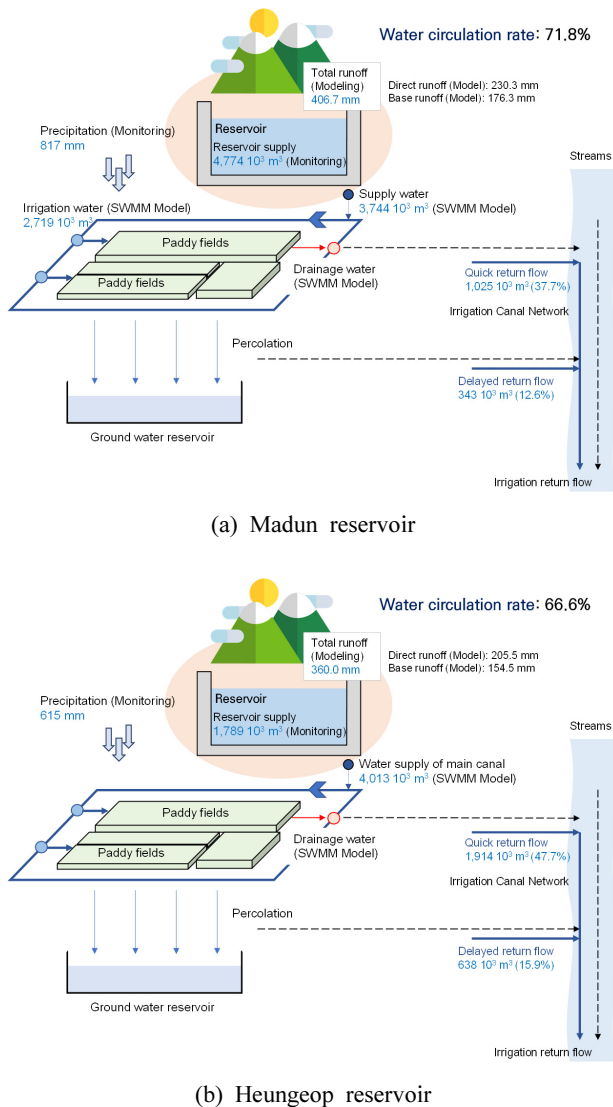


Fig. 7. Results of Water Cycle Analysis in 2019

4. 결론

본 연구에서는 수원공으로부터 공급되는 관개용수 중에서 소비되지 않고 하천으로 유입하는 회귀수량 및 물순환을

을 산정하기 위해 모니터링과 SWMM 모형 모의를 수행하였다. 대상 지역은 경기도 안성시 마둔저수지, 강원도 원주시 흥업저수지로 선정하였으며, 대상 지역의 모니터링 및 모의를 통해 공급량, 배수량, 유출량 등을 산정하였다.

EPA-SWMM 모형의 검증을 위해 수로부 모니터링 공급량과 모의 공급량을 비교하였다. 모니터링 및 SWMM 모형을 통해 농업용수 공급량, 배수량 등을 산정하였다. 또한 물수지 분석으로 침투량을 추정하였으며, 신속회귀수량은 지표배수량, 지연회귀수량은 심층침투량으로 산정하였다.

마둔저수지는 데이터 구득기간에 따라 2010년부터 2019년까지, 흥업저수지는 2017년부터 2019년까지 모의하였으며, 마둔저수지는 연평균 회귀율 55.35%, 흥업저수지는 평균 회귀율은 61.43%로 50% 이상의 회귀율이 추정되었다.

물순환을 산정을 위해 TANK 모형을 통해 일별 유출량을 산정하였으며, 직접유출과 기저유출 분리하였다. 마둔저수지 물순환을 산정결과 2014년이 76.2%로 가장 높은 값으로 나타났으며, 흥업저수지의 경우 68.5%로 2017년의 물순환율이 높게 나타났다. 또한 물순환 요소인 농업용수 공급량, 배수량, 회귀수량, 유출량 등을 통해 농업구역의 물순환 기작 및 특성을 분석하였다.

본 연구에서는 정량적인 농업구역 회귀율 및 물순환을 산정을 수행하였으며, 연구 결과를 통해 농촌지역 특성 및 농촌수자원의 안정적인 공급과 국가 수자원 확보를 위한 통합물관리 정책을 실현하는데 기초자료로 활용 가능할 것이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 한국농어촌공사의 2020년 용역연구사업의 지원을 받아 연구되었음. 본 결과는 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반 및 재해대응 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(121033-3).

References

Bang, N.K. (2019). *Development and application of field management model for agricultural reservoir*. Master's thesis, Hankyong National University.

Choi, J.D., and Choi, Y.H. (2002). Return flow rate estimation of irrigation for paddy culture in the north han river basin. *Journal of Korea National Committee on Irrigation and Drainage*, Vol. 9, No. 2, pp. 68-77.

Choo, T.H. (2004). Return flow analysis of irrigation for a paddy field neighboring the downstream of Weolgok reservoir in the Nakdong river basin. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 24, No. 2B,

- pp. 123-129.
- Chung, I.M., Hong, S.H., Lee, J.W., and Kim, M.G. (2017). Present status and future improvements in groundwater use near streams in the Aseongcheon watershed, Korea. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 27, No. 4, pp. 2287-7169.
- Chung, S.O., and Park, K.J. (2004). Irrigation return flow measurements and analysis in a small size paddy area. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 7, pp. 517-526.
- Im, S.J. (2000). *Modeling irrigation return flow from paddy fields on agricultural watersheds*. Ph.D. dissertation, Seoul, Seoul National University (in Korean).
- Jung, J.H., and Oh, H.J. (2013). An application of integrated water cycle system in U-city. *Journal of the Korean Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 14, No. 2, pp. 6597-6601.
- Kang, M.S. (2015). *Feasibility study on irrigation system flow analysis through SWMM simulation*. Ph.D. dissertation, Seoul, Konkuk University (in Korean).
- Kang, M.S., Srivastava, P., Song, J.H., Park, J.H., Her, Y.G., Kim, S.M., and Song, I.H. (2016). Development of a component-based modeling framework for agricultural water-resource management. *Water*, Vol. 8, No. 8, pp. 1-19.
- Kim, B.S., Lim, S.H., Lee, S.J., Baek, J.S., and Kim, J.M. (2020). A study on the water cycle improvement plan of low impact development. *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 36, No. 2, pp. 109-115.
- Kim, H.D., Kim, J.T., Nam, W.H., Kim, S.J., Choi, J.Y., and Koh, B.S. (2016). Irrigation canal network flow analysis by a hydraulic model. *Irrigation and Drainage*, Vol. 65, pp. 57-65.
- Kim, H.K., Kang, M.S., Lee, E.J., and Park, S.W. (2011). Climate and land use changes impacts on hydrology in a rural small watershed. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 53, No. 6, pp. 75-84.
- Kim, S.H., Song, J.H., Hwang, S.H., Kim, H.K., and Kang, M.S. (2020). Development of agricultural water circulation rate considering agricultural reservoir and irrigation district. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 62, No. 2, pp. 83-95.
- Kim, T.C., Lee, H.C., and Moon, J.P. (2010). Estimation of return flow rate of irrigation water in Daepyeong pumping district. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 52, No. 1, pp. 41-49.
- Koutsoyiannis, D. (2020). Revisiting the global hydrological cycle: it it intensifying? *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 24, pp. 3899-3932.
- Kwak, J.H., Hwang, S.H., Jun, S.M., Kim, S.H., Choi, S.K., and Kang, M.S. (2020). Assessment of future water circulation rate in Dodang watershed under climate change. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 62, No. 4, pp. 99-110.
- Lee, H.C. (2007). *Computation of irrigation return flow in Geum river basin using water balance*. Master's thesis, Chungnam National University.
- Lee, H.W., and Choi, J.H. (2015). Analysis of rainfall runoff characteristics in Shihwa industrial watershed using SWMM. *Journal of the Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 37, No. 1, pp. 14-22.
- Lim, K.J., Park, Y.S., Kim, J., Shin, Y.C., Kim, N.W., Kim, S.J., et al. (2010). Development of genetic algorithm-based optimization module in WHAT system for hydrograph analysis and model application. *Computers & Geosciences*, Vol. 36, No. 7, pp. 936-944.
- Moriasi, D.N., Gitau, M.W., Pai, N., and Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, Vol. 58, No. 6, pp. 1763-1785.
- Nam, W.H., Choi, J.Y., Hong, E.M., and Kim, J.T. (2013). Assessment of irrigation efficiencies using smarter water management. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 55, No. 4, pp. 45-53.
- Nam, W.H., Hong, E.M., and Choi, J.Y. (2016). Assessment of water delivery efficiency in irrigation canals using performance indicators. *Irrigation Science*, Vol. 34, No. 2, pp. 129-143.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual model part 1 - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Park, J.C., and Kim, M.K. (2016). Development and validation of BROOK90-K for estimating irrigation return flows. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, Vol. 23, No. 1, pp. 87-101.
- Park, J.H. (2017). *Development of 4-dimensional agricultural water management system by functional improvement of irrigation facilities*. Ph.D. dissertation, Konkuk University.
- Park, J.H., Kang, M.S., Song, J.H., Jun, S.M., Kim, K.U., and Ryu, J.H. (2015). Web-based data processing and model linkage techniques for agricultural water-

- resource. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 57, No. 5, pp. 101-111.
- Rossman, L.A. (2010). *Storm water management model: User's manual version 5.0. EPA/600/R-05/040*, National Risk Management Research Laboratory, Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- Shin, J.H., Nam, W.H., Bang, N.K., Kim, H.J., An, H.U., and Lee, K.Y. (2020). Assessment of irrigation efficiency and water supply vulnerability using SWMM. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 62, No. 6, pp. 73-83.
- Shin, J.H., Nam, W.H., Bang, N.K., Kim, H.J., An, H.U., Do, J.W., and Lee, K.Y. (2020). Assessment of water distribution and irrigation efficiency in agricultural reservoirs using SWMM model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 62, No. 3, pp. 1-13.
- Song, J.H. (2017). *Hydrologic analysis system with multi-objective optimization for agricultural watersheds*. Ph.D. dissertation, Seoul National University.
- Sugawara, M. (1995). Tank model, in computer models of watershed hydrology. *Water Resources Publications*, pp. 164-214.
- Youcan, F., Steven, B., and Christine, P. (2016). Potential of green infrastructure to restore predevelopment water budget of a semi-arid urban catchment. *Journal of Hydrology*, Vol. 542, No. 542, pp. 744-755.
- Zhang, W., Zhou, T., Zhang, L., and Zou, L. (2019). Future intensification of the water cycle with an enhanced annual cycle over global land monsoon regions. *Journal of Climate*, Vol. 32, No. 17, pp. 5437-5452.

Received	December 30, 2021
Revised	January 3, 2022
Accepted	January 18, 2022