

## HSPF와 다중 저류지 모형을 이용한 농업지역 순환관개에 의한 하천 수질 및 배출부하 영향 분석

이경석\* · 이동훈\* · 안영미\*\* · 강주현\*\*

\*동국대학교 건설환경공학과

\*\*한국환경공단 수생태복원부

### Assessment of stream water quality and pollutant discharge loads affected by recycled irrigation in an agricultural watershed using HSPF and a multi-reservoir model

Kyoung-Seok Lee\* · Dong Hoon Lee\* · Youngmi Ahn\*\* · Joo-Hyon Kang\*\*

\*Department of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University-Seoul

\*\*Korea Environment Corporation, Department of Aquatic Restoration

(Received : 9 August 2023, Revised : 12 October 2023, Accepted : 17 October 2023)

#### 요약

순환관개는 농업유역내 하천수를 상류의 농경지로 재투입시켜 관개용수로써 활용하고 기 사용된 용수는 직접유출 또는 기저유출의 형태로 하천으로 회귀되는 관개방식이다. 순환관개는 용수 및 양분 확보 측면에서 장점이 크지만 순환관개 후 발생하는 회귀수는 과투입된 양분을 함유하고 있어 하천 수질에 악영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 순환관개에 따른 하천 수질변화에 대한 정량적 분석은 효율적인 농업용수 공급과 수질관리대책 수립을 위해 반드시 필요하다. 유역내 수문 및 오염물질의 순환, 그리고 하천수질에 대한 정량적 영향을 통합적으로 분석하기 위하여 유역모델이 주로 활용되고 있으나 대부분의 유역모델들은 순환관개에 의한 수질 영향을 모의할 수 있는 기능을 제공하고 있지 않다. 이에 본 연구에서는 HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran) 유역모델과 다중 저류지 모델(Multi-reservoir model)을 연계하여 순환관개 시스템 운영에 따른 하천수질 영향을 분석하고자 하였다. 연구 대상 지역은 경상남도 창원군 계성천 유역내 순환관개를 시행하고 있는 관곡천 소유역으로 농업활동에 의한 오염물질 배출이 주된 지역이다. 먼저 계성천 및 관곡천을 대상으로 구축된 HSPF모델을 활용하여 관개지역에서의 배출수(직접유출 및 기저유출) 및 하천수에 대한 연간 유량 및 수질 변화 시계열 자료를 생성하고 이를 토대로 자체 구축한 다중저류조 모델을 보정한 후 순환관개 모의에 사용하였다. 다중 저류지 모델에서 관곡천 유역을 관개지역과 관곡천 등 두 개의 하위시스템으로 구성하고 순환관개에 따른 하위시스템내 반응(식물흡수, 흡탈착, 및 소멸) 및 하위시스템 간 물 및 물질(질소 및 인)전달 관계를 모의할 수 있도록 하였다. 최종적으로 순환관개 운영 유무에 따라 총 3개의 시나리오를 구성하여 연간 순환관개용수량 변화에 따른 관곡천 수질영향을 분석하였다.

핵심용어 : HSPF, 다중 저류지모델, 순환관개, 영양염류, 수질

#### Abstract

The recycled irrigation is a type of irrigation that uses downstream water to fulfill irrigation demand in the upstream agricultural areas; the used irrigation water returns back to the downstream. The recycled irrigation is advantageous for securing irrigation water for plant growth, but the returned water typically contains high levels of nutrients due to excess nutrients inputs during the agricultural activities, potentially deteriorating stream water quality. Therefore, quantitative assessment on the effect of the recycled irrigation on the stream water quality is required to establish strategies for effective irrigation water supply and water quality management. For this purpose, a watershed model is generally used; however no functions to simulate the effects of the recycled irrigation are provided in the existing

\*To whom correspondence should be addressed.

Department of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University-Seoul  
E-mail : joohyon@dgu.ac.kr

- Kyoung-Seok Lee Department of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University-Seoul, Korea / Graduate student (jaeleccc@naver.com)
- Dong Hoon Lee Department of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University-Seoul, Korea / Research Fellow (leedonghoon@dgu.ac.kr)
- Youngmi Ahn Korea Environment Corporation, Department of Aquatic Restoration, Incheon, Korea / Deputy general manager (kandari@keco.or.kr)
- Joo-Hyon Kang Department of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University-Seoul, Korea / Professor (joohyon@dgu.ac.kr)

watershed models. In this study, we used multi-reservoir model coupled with the Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) to estimate the effect of the recycled irrigation on the stream water quality. The study area was the Gwangok stream watershed, a subwatershed of Gyeseong stream watershed in Changnyeong county, Gyeongsangnam-do. The HSPF model was built, calibrated, and used to produce time series data of flow and water quality, which were used as hypothetical observation data to calibrate the multi-reservoir model. The calibrated multi-reservoir model was used for simulating the recycled irrigation. In the multi-reservoir model, the Gwangok watershed consisted of two subsystems, irrigation and the Gwangok stream, and the reactions (plant uptake, adsorption, desorption, and decay) within each subsystem, and fluxes of water and materials between the subsystems, were modeled. Using the developed model, three scenarios with different combinations of the operating conditions of the recycled irrigation were evaluated for their effects on the stream water quality.

**Key words** : Hydrological Simulation Program-Fortran(HSPF), Multi-reservoir model, Recycled irrigation, Nutrients, Water Quality

## 1. 서 론

최근 기후변화로 인해 국내 가뭄발생빈도가 증가함에 따라 농업가뭄에 따른 피해가 증가하고 있으며 안정적인 농업용수 공급에 어려움을 겪고 있다.(Lee et al. 2021). 농업 가뭄 또는 유역에서 자체적으로 농업용수 확보가 어려운 경우 양배수장과 같은 수리시설을 통해 상류 지역에 관개용수를 공급한 후 양배수장으로 회귀된 물(‘회귀수’)을 관개용수로 재이용하는 순환형 농업용수 관리방안이 대안으로써 제안되고 있다(Bang et al. 2020). 회귀수란 농업지역에 투입된 관개수가 저류, 수로손실, 지하침투, 침출침투로 인한 수량 손실을 통해 소비된 후(Kim et al. 2010) 그 일부가 침투와 배수 등을 통해 하천 및 수리시설로 회귀되는 용수를 일컫는다(Kim et al. 2022). 우리나라의 농업형태는 고투입·고산출의 집약적인 농업형태를 이루고 있으며(Kim et al. 2015) 단위면적당 과다한 화학비료의 사용으로 인하여 농경지 토양내 양분 함유량이 일반적으로 높은 것으로 알려져 있다(Lee and Lim. 1995). 따라서 농경지내에서의 관개 회귀수는 다량의 영양염류를 포함할 수 있어 하천수질을 악화시키는 원인이 될 수 있다(Park and Kim. 2015; Jang. 2015).

회귀수는 지표배수 및 지하배수 등 하천으로의 배출 경로가 다양하며 배출 경로에 따라 유달율과 유달시간이 상이하기 때문에 정량적인 분석이 매우 까다롭다. 따라서 회귀수에 의한 수질 영향 분석을 위해서는 현장 조사와 수학적 모델링을 병행한 종합적인 해석을 필요로 한다(Chung and Park. 2004). 유역에서의 수문 및 오염물질의 거동을 정량적으로 파악하기 위하여 유역모델이 활용되고 있으며, 모델링에 기반한 다양한 시나리오 분석을 통해 유역내 오염원 관리방안 수립에 따른 수질 개선 효과를 정량적으로 평가할 수 있다(Heo and Kim. 2010). 유역 모델링을 활용한 국내 농업지역 관개회귀수 연구사례를 살펴보면 Kim et al.(2022)은 농촌유역 및 수원공 단위 회귀수량 파악을 위하여 EPA-SWMM모델을 활용하여 소규모 농촌유역에 대한 물순환을 분석하였으며, Lee et al.(2022)은 SWAT모델을 이용하여 유역단위 회귀수량 산정 방법론 제안하고 농업유역내 적용시켜 회귀율을 산정한 바 있다. 그러나 상기

연구들을 비롯한 국내 관개 회귀수 관련 기존연구들은 대부분 회귀수량 산정을 중심으로 연구가 수행되어 왔으며(I m and Park. 2000; Kim et al. 2021), 관개 회귀수 수질과 관련된 연구사례는 비교적 부족한 실정이다.

한편, HSPF(Hydrological Simulation Program-FORT RAN)모델은 준분포형 유역모델로 복합적인 토지이용을 용이하게 반영할 수 있으며(Park et al. 2020) 타 모델과의 유연한 연동이 가능하여 국내 농업지역 오염물질 배출 및 수질변화를 파악하는데 많이 활용되고 있다. HSPF모델은 질소나 인 등의 영양물질의 식생흡수, 토양에서의 고정작용에 의한 손실 등의 상세한 순환기작모의가 가능하여 농업 활동시 사용되는 화학비료의 영향을 상세하게 모의가 가능한 장점을 가지고 있다(Lee et al. 2023). 그러나 HSPF모델의 계산 방식은 상류에서 하류순으로 진행되는 단방향구조의 형식을 가지고 있어(Bicknell et al. 2001) 순환관개 모의에 필요한 하류에서 상류방향으로 이송하는 역흐름 형태의 수질 모의는 불가능한 단점을 가지고 있다.

이에 본 연구에서는 Feedback 구성을 가진 다중 저류지 모델(Multi-reservoir model)(Chapra. 2008)을 구축하고, 이를 HSPF모델과 연계하여 순환관개 시스템 운영에 따른 수질영향을 분석하고자 하였다. 본 연구에서는 낙동강 유역내 순환관개를 실시 중인 관곡천 소유역을 대상으로 수문 및 수질 특성을 상세하게 반영할 수 있는 HSPF모델을 구축하여 농경지에서 하천으로의 유출수(직접유출 및 기저유출) 및 하천에서의 유량 및 오염부하량 시계열 값을 생성한 후 다중 저류지 모델의 경계조건 및 보정자료로 사용하였다. 연구 대상 지역을 2개의 저류형 하위시스템(관개지역 및 하천)으로 분할하여 각 하위시스템내 반응(식물 흡수, 흡탈착 및 소멸) 및 하위시스템 간 물질전달을 모의할 수 있도록 하였다. 최종적으로 순환관개 운영에 따른 3개의 시나리오를 구성하여 연 관개용수량 규모에 따른 수질변화 및 배출부하량을 분석하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 연구지역

연구 대상지역은 경상남도 창녕군 계성천 유역 내 주요

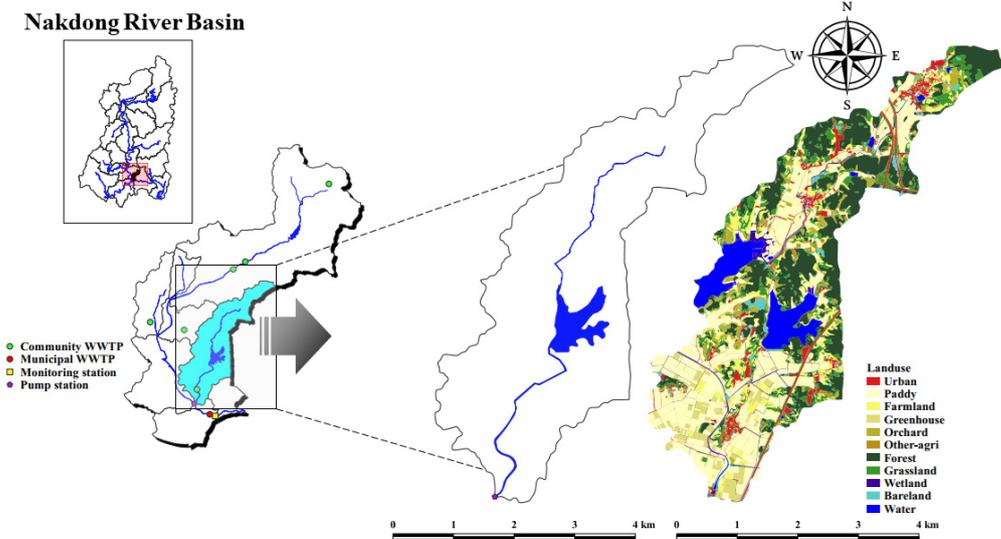


Fig. 1. Landuse map of the study area

지천 중 하나인 관곡천 소유역이다. 계성천유역은 유역면적 약 96.00 km<sup>2</sup>로 토지이용현황은 산림 49.33%, 농업지역 26.13%, 그 외 토지이용 24.54%로 산림을 제외한 대부분이 농업지역이며 상류에는 산림, 중·하류 지역과 하천 주변을 중심으로는 농업지역이 광범위하게 분포하고 있다. 따라서 농업활동시 발생하는 탁수와 화학비료 및 액비의 사용, 축산폐기물이 주요 수계오염물질로 작용하고 있으며 그 외 공공하수처리장, 마을하수도, 개인오수처리시설이 오염원으로 작용하고 있다(Lee et al. 2023). 관곡천 소유역은 유역면적 21.65 km<sup>2</sup>, 유로연장 9.00 km로 계성천 유역 중·하류 지점에 위치하고 있는 지천 유역이다(Fig. 1). 토지이용현황은 시가지 2.1%, 농업지역 63.9%, 산림 8.2%, 초지 3.4%, 습지 8.5%, 나지 11.8%, 수역 2.1%로 농업지역이 전반적으로 넓게 분포되어 있으며 계성천 유역 내에서도 가장 높은 오염기여도를 나타내는 지역이다(MOE, 2022). 현재 관곡천 소유역은 농업용수를 공급하기 위해 순환관개시스템을 활용하고 있는데 관곡천 말단에 위치한 상대포 양배수장에서 하천수를 상류로 이송하여 관개용수로 사용하고 기 사용된 용수는 직접 및 기저유출의 형태로 회귀되어 관곡천으로 유입되는 방식이다. 순환관개에 의한 회귀수는 농경지에 비료의 형태로 투입된 양분 등의 성분을 포함하고 있어 미처리 방류시 계성천 본류 수질을 악화시키는 원인으로 예상된다.

## 2.2 HSPF모델의 활용

HSPF모델은 사용자의 기준에 따라 정의된 하천 경계 및 소유역 구획에 따라 투수(PERLND), 불투수면(IMPLND), 하천 및 호소(RCHRES)로 구분되며 투수면은 다시 표층(Surface layer), 상층부(Upper zone), 하층부(Lower zone), 및 활성지하수대(Active groundwater)로 구분되어 각 컴포넌트 별 수문 및 수질 모의를 수행한다. 농업지역 내

관개용수 사용에 따른 수문 영향은 모의가 가능하지만, HS PF모델은 상류에서 하류 방향으로 순차적으로 계산이 이루어지는 단방향 구조의 모델로써 하류에서 상류로 재이송되어 발생하는 역류 및 혼합현상의 수질영향을 직접적으로 모의하기 어렵다(Bicknell et al. 2001). 이에 본 연구에서는 순환관개 운영에 따른 수문 및 수질영향을 모의하기 위해 Matlab기반의 다중저류지 모델을 자체적으로 구축하여 HSPF와 연계 활용하였다. 본 연구에서는 HSPF모델 구동을 통해 출력한 PERLND 및 RCHRES의 컴포넌트 별 시계열 유량 및 부하량 자료를 가상의 모니터링 자료로써 순환관개 모의를 위해 구축한 다중 저류지 모델의 보정을 위한 경계조건 자료로 활용하였다. HSPF모델은 이전 연구를 통해 구축, 보검정된 모델을 활용하였다. HSPF모델 구축 및 보검정과 관련된 내용은 Lee et al. (2023)에 상세하게 기술되어 있다.

## 2.3 순환관개 시스템 모델링

### 2.3.1 다중 저류지 모델 구축

Fig. 2는 다중 저류지 모델에서의 하위시스템 및 수문 및 물질흐름을 나타낸 것으로 HSPF모델 구축시 분할된 관곡천 소유역을 관개지역(Irrigation area)과 관곡천(Gwan-gok stream) 두 개의 하위시스템 요소로 구분하였다. 모델 구축 기간은 2018~2020년으로 설정하였으며 각 하위시스템은 완전혼합형반응조로 가정하여 내부 오염물질 반응기작을 고려할 수 있도록 하였고, 관개지역에서 관곡천으로의 물질 이동과 관곡천에서 관개지역으로 재이송을 반영할 수 있는 순환형 시스템 구조로 구성하였다. 관개지역내 영양염류의 거동은 식물 흡수, 흡탈착, 및 침침투 손실만이 존재하며 하천에서의 영양염류의 거동은 1차 소멸반응으로 가정하였다. 관개지역내 물과 토양 사이, 즉 고-액 경계면에서의 흡착(또는 탈착)은 유사 1차 반응(Pseudo-first-ord

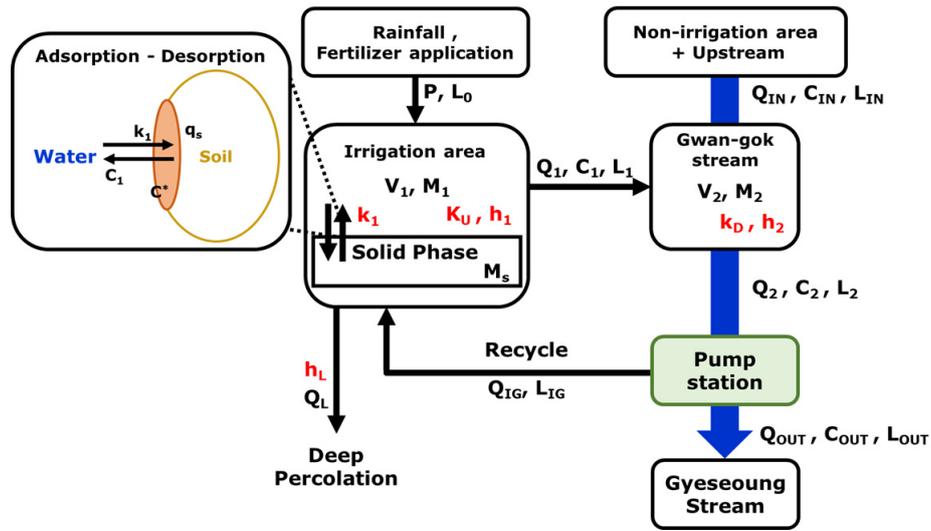


Fig. 2. Schematic diagram of the recycled irrigation system

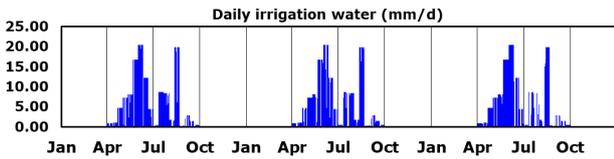


Fig. 3. Daily irrigation water used in the Multi-reservoir model

er)으로 가정하여 모형을 구성하였다(흡착 및 탈착 속도상수는 동일한 것으로 가정). 식물 흡수 및 흡탈착은 식물의 성장 패턴 및 기온의 영향을 받을 수 있으나, 본 모형의 단순성을 위해 해당되는 각 반응상수가 시기에 무관하게 항상 일정함을 가정하여 연간 평균적인 특성으로 고려하였다. 계절별 각 하위시스템 별 유입 및 유출 경계조건은 HSPF 모형 구동을 통해 얻은 PERLND 및 RCHRES 컴포넌트 별 유량 및 부하량 시계열자료를 활용하였다. 관곡천 유역에서 사용되는 실제 월별 순환관개 사용량을 파악하는데 한계가 있어 Choi et al. (2001)에서 제시한 농업지역에서의 일반적인 시기별 관개용수 사용량을 토대로 모의 기간 동안 일별 관개용수 사용량을 산정하여 모형에 반영하였다. 모의년도 별로 영농기인 4~9월에 관개용수를 사용하는 것으로 가정하였으며 해당 기간내 강우가 발생한 일자는 관개용수를 사용하지 않는 것으로 가정하였다. 이후 관개용수량에 따른 수질영향을 분석하기 위해 모형내 관개용수사용량을 정비례로 조절할 수 있도록 하였다(Fig. 3).

2.3.2 모형 지배 방정식 수립

Table. 1은 모형식 수립 시 사용된 변수를 나타낸 것으로 구축된 모형의 하위시스템 별로 물수지방정식(유량)과 물질수지방정식(TN, TP)을 수립하여 상미분방정식으로 유도하였다. 수량모형의 경우 관개지역은 강우유입(P), 순환관개 유입량(Q<sub>IG</sub>), 관개지역에서 관곡천으로의 총유출(Q<sub>1</sub>), 및 침침투율(Q<sub>L</sub>)을 고려하였으며 1차 저류상수(h<sub>1</sub>)와 침

침투투상수(h<sub>L</sub>)를 매개변수로 적용하였다. 관곡천은 상류지역 및 비관개지역 총 유입(Q<sub>IN</sub>), 관개지역에서의 유입(Q<sub>1</sub>), 관곡천 유출(Q<sub>2</sub>), 계성천으로의 유출(Q<sub>OUT</sub>), 순환관개 유량(Q<sub>IG</sub>)을 고려하였으며 1차 저류상수(h<sub>2</sub>)를 매개변수로 하여 물수지방정식을 수립하였다. 수질모형의 경우 관개지역은 월 비로투입에 의한 유입부하(L<sub>0</sub>)를 고려하였으며 식물에 의한 흡수상수(K<sub>U</sub>), 토양흡착평형상수(K<sub>d</sub>), 유사 1차 토양흡착속도상수(k<sub>1</sub>), 유출 및 저류량에 대한 유출 계수(k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub>)를 매개변수로 포함하였다. 관곡천은 상류지역 및 비관개지역에서의 총 유입부하(L<sub>IN</sub>), 관개지역에서의 유입부하(L<sub>1</sub>), 관곡천으로의 유출부하(L<sub>2</sub>), 계성천으로의 유출부하(L<sub>OUT</sub>), 순환관개 유입부하(L<sub>IG</sub>)를 고려하였으며 1차 소멸상수(k<sub>D</sub>)를 매개변수로 적용하여 모형식을 수립하였다. 흡탈착 기작에 의한 물질전달은 고-액 계면에서의 평형농도(C\* = q<sub>s</sub>/K<sub>d</sub>)를 기준으로 흡착속도상수(k<sub>1</sub>)와 곱하여 산정하였으며 관개지역내 총 토양 중량(M<sub>s</sub>)은 HSPF모형내 해당지역 총 부피와 토양공극률을 고려하여 산정하였다. 최종 유도된 다중 저류지 모형의 물질수지 방정식을 아래 식에 나타내었다(식 (1) ~ (5)).

$$\frac{dV_1}{dt} = P + Q_{IG} - Q_1 - Q_L = P + Q_{IG} - (h_1 + h_L) V_1 \tag{1}$$

$$\frac{dV_2}{dt} = Q_{IN} - Q_1 - Q_2 = Q_{IN} - Q_1 - h_2 V_2 \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{dM_1}{dt} &= \frac{d(C_1 V_1)}{dt} \\ &= L_0 + Q_{IG} \cdot (1 - E) \cdot C_2 - C_1 (Q_1 + Q_L) \\ &\quad - f_U K_U (V_1 C_1) + k_1 \left( \frac{q_s}{K_d} - C_1 \right) V_1 - k_2 q_1^3 (V_1 C_1) \end{aligned} \tag{3}$$

$$M_s \frac{dq_s}{dt} = -k_1 \left( \frac{q_s}{K_d} - C_1 \right) V_1 \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \frac{dM_2}{dt} &= \frac{d(C_2 V_2)}{dt} = L_{IN} + L_1 - L_2 - k_D V_2 C_2 \\ &= L_{IN} + L_1 - C_2 Q_2 - k_D V_2 C_2 \end{aligned} \quad (5)$$

2.3.3 모델 매개변수 보정 및 정확도 평가

HSPF모델 구동을 통해 얻은 시계열 모의자료를 다중저류지 모델의 보정을 위한 경계조건 자료로 활용하였다. 우선 수량 모델의 매개변수와 초기값( $h_1, h_2, V_1(0), V_2(0)$ )를 보정한 후 시스템 별 유입 및 유출 시계열을 계산하였다. 수량 모델 보정이 완료된 후 수질 모델의 매개변수와 초기값의 보정을 수행하였으며 TN, TP 항목별 각각  $f_u, k_1, k_2, k_3, k_d, k_D, C_1(0), q_s(0), C_2(0)$ 의 보정을 수행하였다(Table.

2). 모델의 정확도 평가는 HSPF모델 보·검정과 동일하게 수량 및 부하량의 경우  $R^2$ 를 사용하였으며, 수질항목별 농도의 경우 %diff를 사용하여 정확도를 평가하였다 (Donigian, 2002). 아래 식에 각 정확도 지표별 식을 나타내었다.

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg}) \times (S_i - S_{avg})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})^2 \times \sum_{i=1}^n (S_i - S_{avg})^2}} \right]^2 \quad (6)$$

$$\%diff = \left( \sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i \right) / \sum_{i=1}^n O_i \times 100 \quad (7)$$

Table 1. variables used in the multi-reservoir model

Abbreviation	Description	Unit
P	Rainfall	m <sup>3</sup> /d
V <sub>1</sub>	Water storage of the irrigation area	m <sup>3</sup> /d
V <sub>2</sub>	Water storage of the gwan-gok stream	m <sup>3</sup> /d
M <sub>1</sub>	Total mass of the dissolved chemical in the irrigation area	kg/d
M <sub>s</sub>	Total dry mass of soil in the irrigation area	kg
M <sub>2</sub>	Total mass of the chemical in the gwan-gok stream	kg/d
q <sub>s</sub>	Concentration of the chemical adsorbed on the soil	mg/kg
Q <sub>IN</sub>	Inflow rate to the gwan-gok stream from the upstream and non-irrigation areas	m <sup>3</sup> /d
Q <sub>1</sub>	Outflow rate from the irrigation area to the gwan-gok stream	m <sup>3</sup> /d
Q <sub>2</sub>	Outflow rate from the gwan-gok stream before drawing the irrigation water	m <sup>3</sup> /d
Q <sub>IG</sub>	Flow rate of the recycled irrigation	m <sup>3</sup> /d
Q <sub>OUT</sub>	Outflow rate from the reach after drawing the irrigation water	m <sup>3</sup> /d
L <sub>0</sub>	Amount of TN and TP by fertilizer application	kg/d
L <sub>IN</sub>	Total flux from upstream and non-irrigation areas	kg/d
L <sub>1</sub>	Total flux from the irrigation area to the gwan-gok stream	kg/d
L <sub>2</sub>	Total flux of outflow into gwan-gok stream	kg/d
L <sub>IG</sub>	Flux of the recycled irrigation	kg/d
L <sub>OUT</sub>	Total flux of outflow after drawing the irrigation water	kg/d
C <sub>IN</sub>	Mean concentration of the inflow from the upstream and non-irrigation areas	mg/L
C <sub>1</sub>	Outflow concentration of the chemical in the irrigation area	mg/L
C <sub>2</sub>	Outflow concentration of the chemical from the gwan-gok stream	mg/L
C <sub>OUT</sub>	Outflow concentration to the gyeseoung stream	mg/L

Table 2. Calibrated Parameters used in the multi-reservoir model

Abbreviation	Description	Unit	Optimized Value
K <sub>U</sub>	Plant uptake constant	1/d	0.3 ~ 25
K <sub>d</sub>	Adsorption equilibrium constant	1/d	2
k <sub>D</sub>	Decay coefficient	1/d	0.8
k <sub>1</sub>	1st-order kinetic constant	1/d	0.2
k <sub>2</sub>	Mass discharge coefficient of the chemical in the irrigatin area	1/d	50
k <sub>3</sub>	Exponent for the effect of flow on the mass discharge	1/d	30
h <sub>1</sub>	1st-retention constant of the irrigation area	-	0.137
h <sub>2</sub>	1st-retention constant of the gwan-gok stream	-	1.365
h <sub>L</sub>	Deep percolation rate constant	1/d	1.25
f <sub>u</sub>	Plant uptake calibration parameter	-	30

여기서  $O_i$ 는 HSPF 구동 결과값,  $S_i$ 는 다중 저류지 모델 모의 값,  $O_{avg}$ 는 HSPF 구동 결과값의 평균,  $S_{avg}$ 는 다중저류지 모델 모의값의 평균, 그리고  $n$ 는 데이터의 개수이다. 식 (6)은 1에 가까울수록 높은 정확도를 나타내며 식 (7)은 값이 0에 가까울수록 높은 정확도를 나타낸다. 각 항목별 적합도가 'Good' 이상( $R^2 > 0.7$ , %diff < 15; Donigian, 2002)이 될 때까지 보정을 수행하였다.

### 3. 연구결과 및 고찰

#### 3.1 다중 저류지 모델 보정 결과

Fig. 4는 다중 저류지 모델 항목별 보정 결과를 나타낸 것이다. 유량보정 결과 관개지역에서 관곡천으로의 유출( $Q_1$ )은  $R^2 = 0.86$ , 관곡천에서 계성천 본류로의 유출( $Q_2$ )은  $R^2 = 0.75$ 로 모두 'Good'이상의 적합도를 보였다. 수질 항목별 보정결과 TN은 관개지역에서 관곡천으로의 유출

부하( $L_1$ )  $R^2 = 0.75$ , 관곡천에서 계성천 본류로의 유출부하( $L_2$ )  $R^2 = 0.72$ , 관곡천에서 계성천 본류로의 유출농도( $C_2$ ) %diff = 11.31로 나타났으며 TP는 관개지역에서 관곡천으로의 유출부하( $L_1$ )  $R^2 = 0.81$ , 관곡천에서 계성천 본류로의 유출부하( $L_2$ )  $R^2 = 0.86$ , 관곡천에서 계성천 본류로의 유출농도( $C_2$ ) %diff = 11.98로 나타났다. 수질 항목 모두 'Good' 이상의 적합도를 보이며 모델이 유량과 수질 배출부하 및 유출 농도를 적절히 반영하는 것으로 판단된다.

#### 3.2 하천수질 영향 분석

순환관개에 따른 관곡천 수질변화를 분석하기 위해 다음의 총 3개의 시나리오로 구성하였다. 1) S0: 순환관개 미적용, 2) S1: Choi et al. (2001)에서 제시한 연관개용수량 3,500,000  $m^3/yr$ 을 적용, 3) S2: 실제 관곡천 소유역 추정 연관개용수량 5,800,000  $m^3/yr$ 을 적용. 시나리오 분석결과(Fig. 5), 순환관개용수량이 증가할수록 TN의 농도는 다

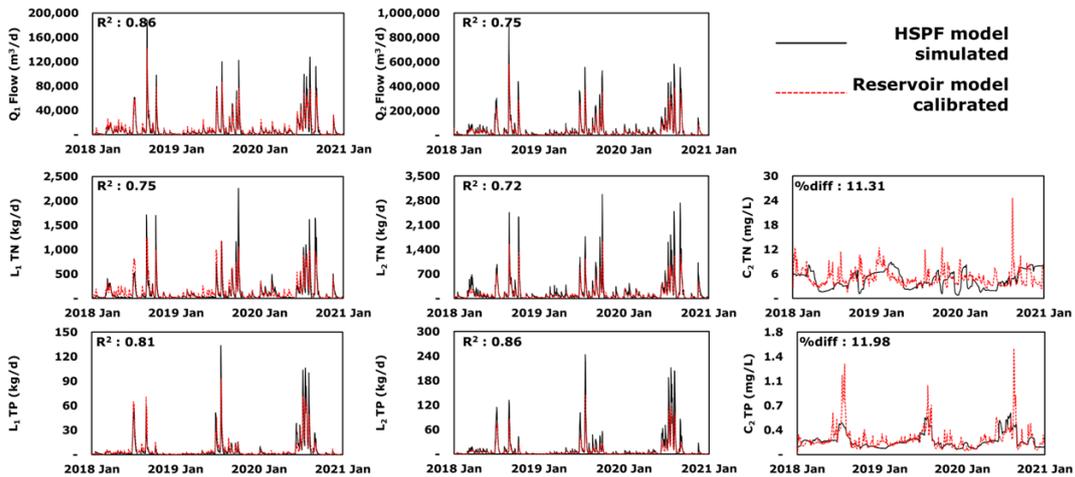


Fig. 4. Results of multi-reservoir model calibration

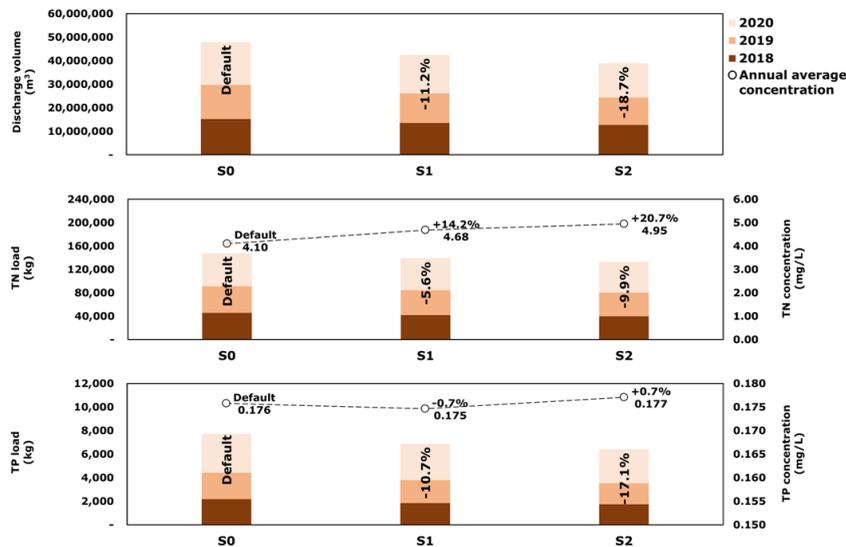


Fig. 5. Simulated loads and concentrations of TN and TP in the Gwan-gok stream for different recycled irrigation scenarios

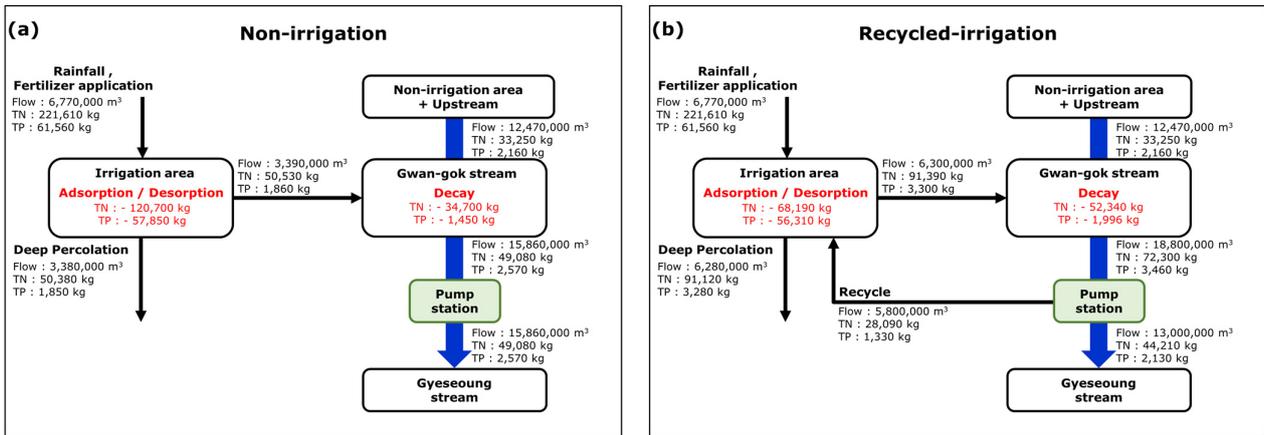


Fig. 6. Flow diagram of water and chemicals in a Recycled irrigation system: (a) without recycled irrigation, and (b) with recycled irrigation (S2)

소 상승하는 경향을 보였으며(각각 14.2%, 20.7% 상승), TP 농도변화는 크지 않았다(각각 0.7% 감소, 0.7% 상승) 이는 인에 비해 토양흡착 친화도가 낮은 질소의 경우 토양 계에서 하천으로의 유출이 상대적으로 원활하기 때문으로 추정된다(Chung et al. 1999). TN 및 TP 부하량의 경우 순환관개 운영시 TN은 각 시나리오별 5.6%, 9.9% 저감되는 것으로 나타났으며 TP는 약 10.7%, 17.1% 저감되는 것으로 나타났다. 순환관개 운영시 평균 농도는 다소 상승하는 경향을 보이거나 관개용수 순환을 통해 유출수 및 오염부하량이 침침투 손실에 의하여 전반적으로 감소하므로 궁극적으로 낙동강 본류로의 TN 및 TP 유입 부하량 저감 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 배출부하량 물질수지 분석

Fig. 6은 연순환관개유량 5,800,000 m<sup>3</sup>/yr (S2)에 대하여 전체 순환관개시스템의 연간 유량 및 수질부하 물질흐름 분석결과를 나타낸 것이다. 순환관개유량이 발생함으로써 관곡천으로의 유출 유량은 약 1.9배 증가하며 관곡천에서 양배수장으로의 유입유량이 약 1.2배 증가하였다. 이 때 침침투에 의한 손실유량 또한 약 1.9배 증가하는 것을 볼 수 있는데 순환관개로 인한 유량상승이 시스템 내 저류량 및 침침투량을 증가 시켰기 때문이며, 침침투에 의한 손실량 증가에 따라 관곡천에서의 최종 유출부하량이 약 80% 정도 수준으로 감소하는 효과를 나타내었다. 순환관개시스템 운영에 따른 관곡천 최종 유출량 저감에 따라 TN과 TP의 최종 유출부하량도 TN 9.9%, TP 17.1% 감소하는 효과를 보였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 관곡천 소유역을 대상으로 다중 저류지 모델과 HSPF모델의 연계를 통해 순환관개 시스템 운영에 따른 관개지역 및 하천에서의 수질영향을 분석하였다. 다중

저류지 모델은 HSPF모델의 모의 결과값을 토대로 보정을 수행하였으며 유역내 수문 및 수질현상을 적절히 반영하는 것으로 나타났다.

순환관개시스템 운영에 따른 하천 수질 영향 모의 결과 순환관개용수량이 증가함에 따라 질소 농도가 상승하는 경향을 보였으며(약 14~20%), 인의 경우는 농도변화가 미미하였다. 순환관개시스템 물질흐름분석을 통해 관개용수 순환과정에서 침침투 및 손실로 인한 유량 및 오염부하량이 저감되는 경향을 보였으며 관곡천에서의 유량은 약 11.2~18.7%, TN부하는 약 5.6~9.9%, TP부하는 약 10.7~17.1% 감소하는 것으로 나타났다. 순환관개용수 사용으로 인한 순환 유량증가는 저류량 및 침침투량을 증가시켜 최종적으로 배출되는 오염부하량을 감소시킬 수 있는 것으로 판단된다. 본 연구에서 구축한 다중 저류지 모델은 유역내 오염물질의 역흐름 분석이 가능하여 기존 HSPF 모델과 같은 유역모델이 갖는 한계점을 보완할 수 있어 향후 다양한 오염물질 순환과정에서의 오염물질 거동 및 수질예측에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 사사

본 연구는 한국환경공단(계성천 유역 농촌 비점오염저감 2단계대책 추진 연구)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

Bang, NK, Nam, WH, Shin, JH, Kim, HJ, Kang, K, Bae k, and SC, Lee, KY(2020). Water balance analysis of pumped-storage reservoir during non-irrigation period for recurrent irrigation water management, *J. of Korean Society of Agricultural Engineers*, 62(4), pp. 1-12. [DOI: <https://doi.org/10.5389/KSAE.2020.62.4.001>] [Korean Literature]

- Bicknell, BR, Imhoff, JC, Kittle, JL, Jobs, TH, Donigian Jr, AS,(2001). Hydrological Simulation Program—FORTRAN (HSPF). User's Manual for Release 12; EPA Environmental Research Laboratory and Office of Surface Water Geological Survey: Athens, GA, USA; Reston, VA, USA.
- Choi, JG, Han, GW, Koo, JW, and Son, JG,(2001). Actual Uses and Water Qualities of Irrigation Water from Agricultural Reservoir and Pumping station, *Korean J. of Soil Science and Fertilizer*, 34(3), pp. 205–212. [Korean Literature]
- Chung, SO, and Park, KJ(2004). Irrigation Return Flow Measurements and Analysis in a Small Size Paddy Area, *J. of Korea Water Resources Association*, 37(7), pp. 517–526. [DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWR.A.2004.37.7.517>] [Korean Literature]
- Chung, JB, Kim, MK, Kim, BJ, and Park, WC(1999). Nitrogen, phosphorus and organic carbon discharge in the small agricultural watershed catchment, *Korean J. of Environment Agriculture*, 18(1), pp. 70–76. [Korean Literature]
- Donigian Jr, AS(2002). Watershed model calibration and validation: The HSPF experience, In: TMDL Conference 2002, *Water Environment Federation*, pp. 44–73.
- Heo, J, and Kim, TG(2010). Effects of Cell Size for Nonpoint Pollution Load on Distributed Watershed Model, *J. of Korea Society Environmental Technology*, 11(4), pp. 187–195. [Korean Literature]
- Im, SJ, and Park, SW(2000). Development of an irrigation return water quantity estimation model for agricultural watersheds, *J. of Korea Water Resources Association*, 33(1), pp. 441–446. [Korean Literature]
- Jang, IH(2015). A study on the precautionary prevention of soil environment pollution from chemical fertilizers for guarantee of environmental right in the constitution, *Chosun Law Journal*, 22(1), pp. 125–156. [Korean Literature]
- Kim, CG, Jeong, HK, Moon, DH, and Han, JH(2015). An analysis of the factors affecting farmers recognition and acceptance on sustainable agriculture, *Korea J. of Organic Agriculture*, 23(2), pp. 247–265. [DOI: <http://dx.doi.org/10.11625/KJOA.2015.23.2.247>] [Korean Literature]
- Kim, HY, Nam, WH, Mun, YS, Bang, NK, and Kim, HJ(2021). Estimation of irrigation return flow on agricultural watershed in madun reservoir, *J. of Korean society of Agricultural Engineers*, 63(2), pp. 85–96. [DOI: <https://doi.org/10.5389/KSAE.2021.63.2.085>] [Korean Literature]
- Kim, HY, Nam, WH, Mun, YS, An, HU, Kim, Jg, Shin, Yc, Do, JW, and Lee, KY(2022). Estimation of irrigation return flow from paddy fields on agricultural watersheds, *J. of Korea Water Resources Association*, 55(1), pp. 1–10 [DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWR.A.2022.55.1.1>] [Korean Literature]
- Kim, TC, Lee, HC, and Moon, JP(2010). Estimation of Return Flow Rate of Irrigation Water in Daepyeong Pumping District, *J. of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 52(1), pp. 41–49. [DOI: <https://doi.org/10.5389/KSAE.2010.52.1.041>] [Korean Literature]
- Lee, CH, and Lim, SK(1995). Studies on the behavior of N, P, K fertilizers applied in paddy soils and the water pollution caused by the leachate, *J. of Korean Society on Water Environment*, 11(4), pp. 279–285. [Korean Literature]
- Lee, JW, Jung, Cg, Kim, Dy, Maeng, Sj, Jeong, Hs, Jo, Ys, and Kim, Sj(2022). A study on estimating the quick return flow from irrigation canal of agricultural water using watershed model, *J. of Korea Water Resources Association*, 55(5), pp. 321–331. [Korean Literature]
- Lee, KS, Lee, DH, Ahn, YM, and Kang, JH(2023). Predicting the Effects of Agriculture Non-point Sources Best Management Practices (BMPs) on the Stream Water Quality using HSPF, *J. of Wetlands Research*, 25(2), pp. 99–110. [DOI: <https://doi.org/10.17663/JWR.2023.25.2.99>] [Korean Literature]
- Lee, SK, Oh, Kr, Jeong, Sm, and Cheong, TS(2021). Development of agricultural water demand and supply drought index (AWDSI) in evaluating daily agricultural drought in small administrative districts, *J. of Korean Society of Hazard Mitigation*, 21(2), pp. 159–170. [DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2021.21.2.159>] [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE)(2022). *The Pilot Project Establishment of Nonpoint Source Management Measure in Gyeseong-stream Watershed*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Park, JC, and Kim, MK(2015). Development and validation of BROOK90-K for estimating irrigation return flows, *J. of Korean Geomorphological Association*, 23(1), pp. 87–101. [DOI: <http://dx.doi.org/10.16968/JKGA.23.1.7>] [Korean Literature]
- Park, YS, Ryu, JC, Kim, JG, Kum, DH, and Lim, KJ(2020). Review of Features and Applications of Watershed-scale Modeling, and Improvement Strategies of it in South-Korea, *J. of Korean Society on Water Environment*, 36(6), pp. 592–610. [DOI: <https://doi.org/10.15681/KSWE.2020.36.6.592>] [Korean Literature]
- Steven C. Chapra(2008). *Surface Water-Quality Modeling*

ng, *WCB McGraw-Hill*, Boston, Massachusets.  
Yi, HS, Kim, JK, and Lee, SU(2008). Development of T  
urbid Water Prediction Model for the Imha Dam W

atershed using HSPF, *J. of Korean Society of Enviro  
nmental Engineers*, 30(8), pp. 760–767. [Korean Lit  
erature]