

## SWAT 모형을 활용한 유황별 비점오염 저감 효율 분석 - 달천 유역을 대상으로 -

김수홍<sup>1</sup> · 홍지영<sup>2</sup> · 박운지<sup>3a</sup> · 김종건<sup>3b</sup> · 임경재<sup>3c,†</sup>

<sup>1</sup>한국환경연구원 · <sup>2</sup>보스턴대학교 · <sup>3</sup>강원대학교 지역건설공학과

## Analysis of Efficiency of Pollution Reduction Scenarios by Flow Regime Using SWAT Model - A case study for Dalcheon Basin -

SooHong Kim<sup>1</sup> · Jiyeong Hong<sup>2</sup> · Woonji Park<sup>3a</sup> · Jonggun Kim<sup>3b</sup> · Kyoungjae Lim<sup>3c,†</sup>

<sup>1</sup>Korea Environment Institute(KEI)

<sup>2</sup>Department of Earth and Environment, Boston University

<sup>3</sup>Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

(Received 18 September 2021, Revised 16 November 2021, Accepted 19 November 2021)

### Abstract

The recent climate change and urbanization have seen an increase in runoff and pollutant loads, and consequently significant negative water pollution. The characteristics of the pollutant loads vary among the different flow regime depending on their source and transport mechanism, However, pollutant load reduction based on flow regime perspectives has not been investigated thoroughly. Therefore, it is necessary to analyze the effects of concentration on pollutant load characteristics and reductions from each flow regime to develop efficient pollution management. As non-point pollutants continuously increase due to the increase in impervious area, efficient management is necessary. Therefore, in this study, 1) the characteristics of pollutant sources were analyzed at the Dalcheon Basin, 2) reduction of nonpoint pollution, and 3) reduction efficiency for flow regimes were analyzed. By analyzing the characteristics of the Dalcheon Basin, a reduction efficiency scenario for each pollutant source was constructed. The efficiency analysis showed 0.06% to 5.62% for the living scenario, 0.09 to 24.62% for the livestock scenario, 0.17% to 12.81% for the industry scenario, 9.45% to 38.45% for the land scenario, and 9.8% to 39.2% for the composite scenario. Therefore, various pollution reduction scenarios, taking into account the characteristics of pollutants and flow regime characteristics, can contribute to the development of efficient measurements to improve water quality at various flow regime perspectives in the Dalcheon Basin.

**Key words** : Flow regime, Non-point pollutant, Reduction efficiency, SWAT

<sup>1</sup> 연구원(Researcher), kimsh@kei.re.kr, <https://orcid.org/0000-0003-1766-9408>

<sup>2</sup> 박사과정(Ph.D. Student), jiyeong.hong.1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9731-0272>

<sup>3a</sup> 선임연구원(Senior Researcher), pwj98@kangwon.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0001-6099-4658>

<sup>3b</sup> 교수(Professor), jgkim@kangwon.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0001-8813-9282>

<sup>3c</sup> Corresponding author, 교수(Professor), kjlim@kangwon.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0001-6727-9059>

## 1. Introduction

최근 기후변화에 따른 집중호우와 더불어 도시화로 인한 불투수면적의 증가로 인해 강우시 유출량이 증가하고 있으며, 이는 지표면의 오염물질 유출량을 증대시켜 수질오염에 큰 영향을 준다(Gong and Kim, 2018; Lee et al., 2019). 특히 불투수면적이 증가함에 따라 비점오염물질의 유출은 계속적으로 증가하며, 비점오염원에서 발생하는 비점오염물질은 강우시 발생하므로 삭감이 어려울 뿐 아니라 지속적으로 비중이 증가한다(Lee, 2016). 비점오염원이란 도시, 농지, 도로 등 불특정 장소에서 불특정하게 배출되는 오염원을 의미하며(Kim et al., 2019), 배출 경로가 명확하지 않고 넓게 분포되어 관리하는 데 어려움이 있다(Lee and Kim, 2019). 환경부 제3차 비점오염원관리종합대책(2021~2025년)에 따르면 전국 수질오염원 중 비점오염원에 의한 부하량은 72.1%를 차지하고 있으며, 점오염원 부하량은 지속적으로 감소하여 상대적으로 비점오염원의 비중은 점차적으로 증가하고 있는 추세이다(ME, 2020). 따라서 비점오염원을 효율적으로 관리하는 것이 수질 관리의 핵심으로 여겨지며(Gang, 2012), 비점오염원 관리와 효과를 분석한 다양한 연구와 지자체의 노력이 이루어지고 있다.

Choi et al. (2017)은 석문호 유역을 대상으로 수질 모델 Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC)를 이용하여 비점오염원 배출 특성을 분석 및 호소 수질 변화 예측을 통해 수질 개선 방안 마련을 위한 연구를 수행하였다. Ryu et al. (2018)은 비점오염원 관리의 필요성을 분석하기 위해 도암호 유역을 대상으로 Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 모형을 활용하여 장기강우조건 및 흙탕물 사업에 따른 관리 목표와 저감량을 평가하였다. Kim et al. (2019)은 광주광역시를 대상으로 비점오염저감사업 추진에 따른 관리목표 달성도를 평가하고 비점오염원 영향을 분석하여 관리의 필요성을 평가하는 연구를 수행하였다. Lee et al. (2019)은 자란만·고성만 유역을 대상으로 비점오염원 영향을 고려하여 오염원별 기여율을 분석하고 Spatio-Temporal River-basin Ecohydrology Analysis Model (STREAM) 모형을 적용하여 해역으로 유입되는 부하량의 특성을 분석하였다. Lee (2016)는 외남천 유역을 대상으로 SWAT 모형을 활용하여 소유역별 비점오염 배출량을 예측하고 유량 및 수질 특성을 분석하였다. Kim et al. (2015)은 비점오염 배출과 유역 특성을 고려하여 관리 목표 설정에 있어 유역 모델과 부하지속곡선 방법을 이용하는 방법을 제시하였다. Yoon et al. (2007)은 Window interface to Hydrological Simulation Program-FORTRAN (WinHSPF) 모델을 이용하여 남한강 상류 지역을 대상으로 오염부하량을 산정하고, Best Management Practices Evaluation (BMPRACT) 모듈을 이용하여 비점오염물질 저감 효과를 평가하였다. Kim et al. (2007)은 용담댐 유역을 대상으로 SWAT 모델을 활용하여 수변 완충지대와 식생여과대의 비점오염물 제거 효율을 평가하고 적용 가능성을 제시하였다.

각 지자체에서는 비점오염원을 관리하지 않고는 수질 관리에 한계가 있으므로 오염총량관리제 수행을 통해 할당된 목

표 수질을 달성하기 위하여 비점오염원 배출 부하량을 규제하고 있다(Choi et al., 2010). 비점오염원 관리를 위해서는 막대한 재원이 요구되므로 국고 지원 비점오염원 저감 사업, 비점오염원 관리에 따른 수질 모니터링을 위한 비점측정망 설치 및 운영 등 다양한 사업이 추진되고 있다(Park et al., 2019). 환경부는 ‘물환경보전법’에 따라 비점오염원 관리 종합대책을 수립하여 부문별 저감 대책을 통해 비점오염원 배출부하량 및 총인 발생량을 줄여 녹조 예방, 수생태계 건강성 회복, 도시침수 예방 등 다양한 효과를 기대하고 있다(ME, 2020).

비점오염원 저감 및 관리방안과 관련된 다양한 연구가 수행되고 있으나 비점오염원의 지속적인 관리를 위해서는 비점오염 물질이 배출되는 해당 유역의 지형학적 특성 뿐 아니라 오염 물질의 배출 특성을 고려한 관리가 필요하다(Kim et al., 2015). 또한 오염부하의 특성은 유황별로 다르게 나타날 수 있으므로 수질오염 저감 효과에 대한 유황별 분석이 필요하다(Kim et al., 2017). 하지만 기존의 연구는 오염 부하량 특성 분석 및 저감 효과 평가에 대한 연구가 주로 진행되었기 때문에 유황별 분석에 대한 내용이 부족한 실정이다(Jeon et al., 2020; Jeong et al., 2017; Ki et al., 2019; Lim et al., 2021). 또한 환경부에서는 비점오염원관리제도를 통해 비점오염물질 발생 억제 등을 위한 다양한 이행 방법을 제시하고 있을 뿐 아니라 유황별 분석을 통한 저감 대책 수립에 많은 노력을 기울이고 있다. 하지만 유역의 오염원별 특성이 반영된 유량의 유황 분석에는 한계가 있으며, 정확한 저감방안 확립을 위해서는 대상 지역의 오염원 특성을 파악하고 그에 따른 저감 방안을 적용했을 때의 유황별 저감 효율 분석이 필요하다. 이에 본 연구에서는 남한강 분류 수질에 영향을 많이 미치는 달천 유역을 선정하여 1) 달천 유역의 주요 배출 오염원 특성 분석을 수행하고 2) 유역 특성에 맞는 비점오염 저감 대책을 구성하여 3) 유역별, 유황별 저감 효율 분석을 수행하였다.

## 2. Materials and Methods

유역 특성을 고려한 오염저감방안 설정 그리고 그에 따른 저감 효과를 정량적으로 평가하기 위해 통상적으로 유역 모델이 많이 적용되고 있다(Yu et al., 2011; Song et al., 2015). 따라서 본 연구에서는 유역 모델인 SWAT 모형을 활용하여 유역별 오염원 특성을 고려한 저감 시나리오를 구성하고, 유황별(홍·풍수기, 평·저·갈수기) 수질 개선 효율을 분석하기 위해 달천 유역 전체 및 오염우심유역(음성천, 요도천, 달천하류)을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 유량 및 수질(Biochemical Oxygen Demand, BOD<sub>5</sub>), Total Nitrogen (TN), Total Phosphorus (TP)을 모의하였다. 그리고 유역별, 유황별 저감 시나리오 모의 결과를 바탕으로 BOD<sub>5</sub>, TN, TP 저감 효율을 분석하였다.

### 2.1 연구대상지역

본 연구의 대상 지역인 달천 유역은 남한강 수계의 중·상

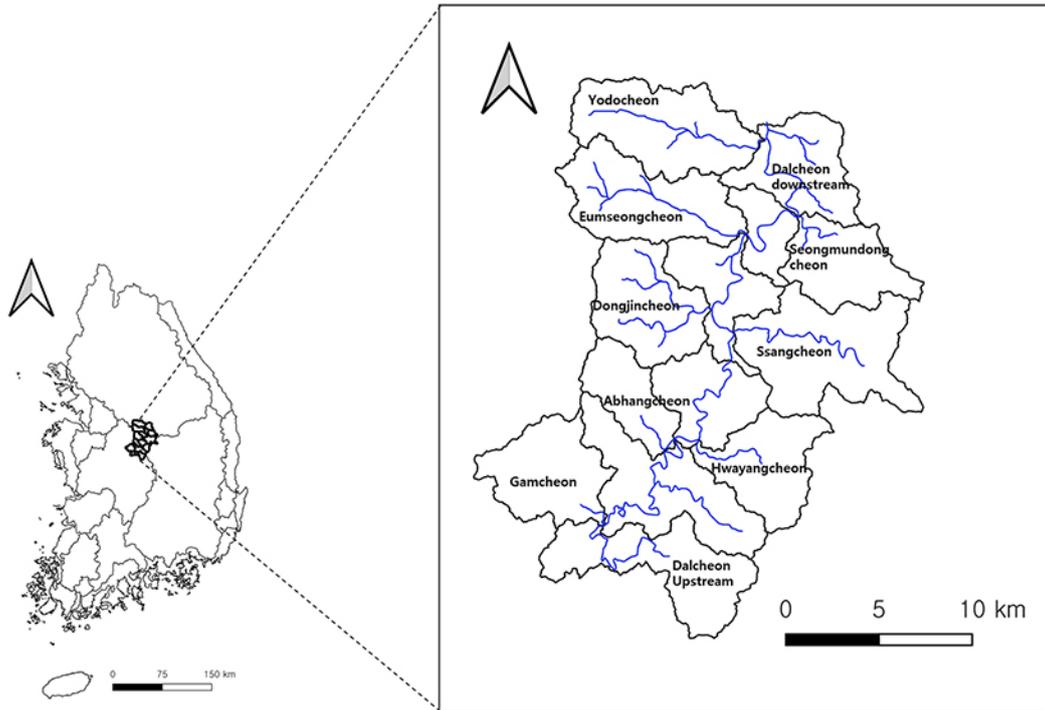


Fig. 1. The study area (Dalcheon).

류부로 국가하천 구간인 달천과 35개의 지방하천으로 구성되어 있으며, 총 14개의 소권역(괴산댐, 음성천, 요도천, 압향천합류점, 석문동천, 동진천, 달천상류, 화양천, 압향천, 쌍천, 성문동천합류점, 달천하류, 괴산댐하류, 감천)으로 구분된다 (Fig. 1). 이 중 전국오염원조사자료를 통한 오염원 분석 및 수질 모니터링 평가 결과 음성천, 요도천, 달천하류 유역은 오염우심지역으로 선정되었다. 달천은 유역면적 1,606.8 km<sup>2</sup>, 하천연장 123 km, 평균고도 EL.299 m의 특성을 가지고 있으며, 남한강 수계의 중권역 중 하나로, 충청북도 보은군 속리산에서 발원하여 보은군, 괴산군, 충주시 일대에 걸쳐 흐르고 있다. 달천 유역은 산림 지역이 전체 면적의 68%로 가장 많으며, 농업지역이 21%로 두 번째로 높은 비율을 차지하고 있다. 달천 유역은 기후변화로 인한 강수량 및 유량 변동성이 커지는 추세로, 이러한 기후의 영향은 달천 유역 및 남한강 본류의 수질에도 영향을 미칠 수 있으므로 오염원 분석 및 저감 방안에 대한 효율 분석이 필요하다(Wonju Regional Environmental Office, 2016). 이에 유역별 오염원 특성을 고려한 비점오염 저감 시나리오를 구성하고 이에 따른 유황별 저감 효율을 분석하기 위해 달천유역을 연구대상지역으로 선정하였다.

## 2.2 SWAT 모형을 이용한 모의

### 2.2.1 SWAT 개요 및 입력자료 구축

SWAT 모형은 준분포형 장기 강우-유출모델로 미국 농무성 농업연구소(United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service)에서 다양한 토성, 토지이용 및 토지관리 상태를 반영하여 유출수 및 농업화학물질 등의 각

종 오염원의 거동을 시·공간적으로 모의하기 위해 개발하였다(Arnold et al., 1998). SWAT 모형은 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표유출, 기저유출, 지하수, 토양수분 등에 대한 모의를 각 수문반응단위(Hydrologic Response Units, HRUs)별로 계산한다(Arnold and Allen, 1999). 전체 유역을 작은 소유역으로 구분할 수 있으므로 최소 유역 단위와 유사하게 유역을 구분하여 유역 내 강수에 따른 유출 및 비점오염원의 발생 및 거동의 시·공간적 변화를 분석할 수 있다(Lee et al., 2011). 또한 강우/비강우시에 유역 내의 오염물질 유출 모의가 가능하여 지금까지 개발된 유역모델 중 수질·수문 현상의 재현능이 가장 우수한 SWAT 모형을 선정하였다. 특히, SWAT은 강우-유출모델과 수질 모델이 GIS와 연계된 호환모델로 장기 유량과 수질을 모의할 수 있고 경작 형태나 기후 및 식생 등의 변화에 따른 수질의 상대적 효과도 정량화할 수 있는 특징을 가지고 있다.

SWAT 모형을 구축하기 위하여 국토지리정보원(MOLIT, 2010)에서 제공하는 수치지도(1:5,000)를 이용하여 수치표고 모형(Digital Elevation Model, DEM)을 구축하고 환경부 환경공간정보서비스(ME, 2010)에서 제공하는 토지피복도를 활용하여 토지이용도를 구축하였다. 또한 토양도의 경우 농촌진흥청(National Institute of Agriculture Sciences, 2019) 휴토람에서 제공하는 1:25000 정밀 토양도를 활용하였으며 기상자료(강수량, 온도, 풍속, 습도, 일사량)의 경우 기상청(KMA, 2015)에서 제공하는 자료를 2015년부터 2020년 6월까지 5년 6개월 기간에 대하여 수집하였다. 기상 자료는 2015년부터 2017년에 해당하는 3년의 모델 안정화 기간(warm-up)을 고려하였다. 본 연구에서는 달천 유역에 대하여 SWAT 모델의 유량 및 수질 모의에 필요한 점오염원 입력자료를 구축하였

다. 환경기초시설의 방류량 및 방류 수질 자료를 조사한 결과, 요도천 소권역의 경우 8개, 달천하류 소권역의 경우 11개, 음성천 소권역의 경우 2개의 환경기초시설이 존재하는 것으로 나타나 이에 대한 점오염원 입력자료를 구축하여 모델에 적용하였다. 또한 유역 내 축산계 오염원, 미처리 하수 발생량에 대한 하수 배출량과 같은 생활계 오염원, 산업계 시설의 개별처리방류량과 처리 수질 등의 산업계 오염원 자료를 조사하여 유역 내 오염원 특성을 반영한 정확한 수질 모의가 가능하도록 모형을 구축하였다.

2.2.2 SWAT 모형을 이용한 유량 및 수질 보정

본 연구에서는 정확한 수질 모의를 위해 앞에서 산정한 소권역별 BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P 배출부하량을 고려하여 SWAT 모형 모의를 진행하였다. 2019년부터 2020년까지 평수기, 저수기, 갈수기 구간에서 유량과 수질에 대해 유역 말단에서 실측 모니터링을 월평균 2회 진행하였으며, 대상유역의 모니터링 결과를 통해 분석된 유량과 수질 자료를 이용하여 보정을 수행하였다. 유량과 수질 항목에 대한 매개변수 보정은 SWAT-CUP 프로그램과 시행착오법을 통해 수행하였으며 모의 결과에 대한 정확도 평가는 유효지수(Nash and Sutcliffe efficiency, NSE)와 결정계수(Coefficient of determination, R<sup>2</sup>)를 이용하였다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2} \tag{1}$$

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

위 식에서 P<sub>i</sub>는 모의치, O<sub>i</sub>는 실측치, n은 전체 데이터 수,  $\bar{O}_i$ 는 실측치의 평균값을 의미한다. R<sup>2</sup>와 NSE는 1에 가까울수록 모델의 예측치가 실측치를 잘 예측하여 모델 효율이 높아짐을 의미한다. 보정 결과는 Moriasi et al. (2015)가 제시한 기준에 따라 매우 좋음(Very good), 좋음(Good), 만족(Satisfactory), 불만족(Unsatisfactory)으로 구분하여 평가하였다(Table 1).

SWAT 모형의 보정을 수행하기 위해 달천 유역 내 오염우심지역의 모니터링 실측 자료를 활용하였다. 오염우심지역은

달천 유역 내 주요 지류에 대한 수질 및 수생태 모니터링 조사 결과 및 전국오염원조사자료를 바탕으로 한 BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P의 발생/배출 오염부하량 산정을 통해 주요 오염 소권역을 선정하였으며, 선정된 오염우심지역은 음성천, 요도천, 달천 하류 소권역으로 나타났다. 보정을 위해 사용한 실측 자료는 달천 유역의 18년 10월부터 19년 4월까지 월 2회 실측한 유량 및 수질 자료를 사용하여 매개변수를 보정하였다. 다만, 보정 결과에 따른 검증은 수행하기에는 실측 자료가 충분치 않아 본 연구에서는 보정만을 진행하였다. 현재 SWAT 모델은 국내 수질측정망에서 제공하는 측정자료인 BOD<sub>5</sub>가 아닌 CBOD<sub>u</sub>만을 모의할 수 있다. 따라서 SWAT 모델의 CBOD<sub>u</sub> 모의 결과를 국내 수질측정망 자료와 비교하는 것은 한계가 있으므로 본 연구에서는 BOD<sub>5</sub> 모의를 위해 수정된 SWAT 모델 엔진을 사용하였다(Han-river Regional Environmental Office, 2018). 아래의 식 (3)은 BOD<sub>5</sub>를 모의하기 위한 식이며(NIER, 2005), 여기서 BOD<sub>5</sub>는 실험실에서의 BOD<sub>5</sub> 농도(mg/L), CBOD<sub>u</sub>는 탄소계 BOD<sub>u</sub> 농도(mg/L), kdb는 20°C에서 CBOD<sub>5</sub>의 환원 비율 계수(/day), NH<sub>3</sub>는 하천의 암모니아 농도(mg/L), knb는 20°C에서 CBOD<sub>5</sub>의 질산화비율 계수(/day), ai<sub>4</sub>는 유닛당 조류호흡의 산소 섭취 비율(/day), algcon은 하천의 최초 조류생물량 농도(mg/L), rhoq는 20°C에서 조류 호흡 비율(/day)을 의미한다.

$$bottleBOD_5 = CBOD_u \cdot (1 - e^{-5 \cdot kdb}) + 4.57 \cdot (NH_3) \cdot (1 - e^{-5 \cdot knb}) + ai_4 \cdot algcon \cdot (1 - e^{-5 \cdot rhoq}) \tag{3}$$

2.2.3 저감 시나리오 구성 및 저감 효율 분석

대상 유역 내 소권역 중 전국오염원 조사자료 및 평수기 유량과 수질 모니터링 자료를 통해 요도천, 음성천, 달천하류 소권역이 오염우심지역으로 선정되었으며, 달천하류 소권역의 경우 도시화가 많이 진행되어 생활계 오염원이 가장 큰 비중을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 음성천과 요도천 소권역의 경우 다수의 축산농가와 산업단지가 위치해 있으며 농경지도 다수 분포되어 있는 유역으로 달천유역의 수질 개선을 위해서는 개인하수처리시설 방류, 축산 퇴비 관리, 토지계 비점오염 발생 관리에 대한 대책이 필요한 것으로 판단하였다. 따라서 달천 유역의 특성을 반영한 생활계, 축산계, 산업계, 토지계 총 4가지의 오염원을 고려한 저감 시나리오를 구

Table 1. Model evaluation index (Moriasi et al., 2015)

Evaluation		Very good	Good	Satisfactory	Unsatisfactory
R <sup>2</sup>	Flow	R <sup>2</sup> > 0.85	0.75 < R <sup>2</sup> ≤ 0.85	0.60 < R <sup>2</sup> ≤ 0.75	R <sup>2</sup> ≤ 0.60
	P	R <sup>2</sup> > 0.80	0.65 < R <sup>2</sup> ≤ 0.80	0.40 < R <sup>2</sup> ≤ 0.65	R <sup>2</sup> ≤ 0.40
	N	R <sup>2</sup> > 0.70	0.60 < R <sup>2</sup> ≤ 0.70	0.30 < R <sup>2</sup> ≤ 0.60	R <sup>2</sup> ≤ 0.30
	General	R <sup>2</sup> > 0.80	0.70 < R <sup>2</sup> ≤ 0.80	0.50 < R <sup>2</sup> ≤ 0.70	R <sup>2</sup> ≤ 0.50
NSE	Flow	NSE > 0.80	0.70 < NSE ≤ 0.80	0.50 < NSE ≤ 0.70	NSE ≤ 0.50
	N/P	NSE > 0.65	0.50 < NSE ≤ 0.65	0.35 < NSE ≤ 0.50	NSE ≤ 0.35
	General	NSE > 0.80	0.60 < NSE ≤ 0.80	0.50 < NSE ≤ 0.60	NSE ≤ 0.50

**Table 2.** Scenarios of water quality improvement at the Dalcheon basin

Division		Contents	Target watershed
Scenario 1	Living	Connection to sewage treatment, reduction of water consumption	Dalcheon downstream
Scenario 2	Livestock	Consignment treatment of top 20% of livestock, installation of outflow prevention facilities	Eumseongcheon, Yodocheon, Dalcheon downstream
Scenario 3	Industrial	Connection of Industrial wastewater treatment plant, public sewage treatment plant	Eumseongcheon, Yodocheon, Dalcheon downstream
Scenario 4	Land	Application of runoff reduction effect to paddy fard fields	Eumseongcheon, Yodocheon, Dalcheon downstream
Scenario 5	Combined	Combined Scenario (Living, Livestock, Industrial, Land)	Eumseongcheon, Yodocheon, Dalcheon downstream

축하고 모델링 적용을 통해 시나리오별 수질 항목에 대한 저감 효율을 분석하였다(Table 2).

달천 유역 내 오염 저감을 위한 생활계 시나리오(시나리오 1)로 하수 미처리구역 하수발생량 연계처리 및 물 사용량 절감을 통한 하수처리장 유입수 절감 효과를 분석하였으며, 2019년 전국오염원조사자료의 환경기초시설 방류수 유량 및 수질 데이터를 활용하였다(ME, 2019). 이때, 요도천과 음성천 소권역의 생활계 오염원의 경우 달천 전체 유역 배출 오염원의 약 8.8%, 16.7%, 달천하류 소권역 생활계 배출 오염원의 약 15%, 4%에 해당하여 그 영향이 적은 것으로 판단되어 본 시나리오 분석에서는 제외하였다. 마을하수도 연계 처리에 따른 수질 개선 효과를 평가하기 위하여 배출되는 미처리구역 하수발생량의 방류량 및 농도와 마을하수도 및 공공하수처리시설의 방류수 농도를 모델의 입력자료로 구축하였으며, 달천하류 소권역을 대상으로 마을하수도 연계 처리를 통한 수질 개선 효과를 분석하였다. 달천하류 소권역은 본류에 위치해 있기 때문에 달천하류 소권역에 해당하는 모든 소유역에 적용한 효율을 분석하기 위해서는 유역 전체의 발달을 확인해야 한다. 따라서 달천하류 소권역에 적용한 오염 저감 효율은 유역 전체 발달에서의 효율로 검토하였다. 또한 축산계 시나리오(시나리오 2)로 분뇨 배출 방지 시설 설치 및 위탁 처리에 따른 수질 개선 효과를 분석하였다. 달천 유역 내 오염우심지역 중 음성천과 요도천의 경우 축산계 부하가 유역 전체 발생부하의 42.7%, 44.2%로 타 오염원에 비해 큰 비중을 차지하고 있다. 2019년 전국오염원조사자료를 이용하여 달천유역 내 축산계 살포지역용도를 조사한 결과, 모델링에 반영한 오염우심지역 내 개별처리농가에 대하여 돈분과 우분 모두 밭에 살포하는 것으로 조사되었으며 우분의 경우 밭에 살포한다고 가정해도 표준시비량에 포함되는 양이므로 모두 시비하는 것으로 간주하였다. 따라서 달천유역 내 축산농가 중 사육두수 기준 상위 20% 농가에서 발생하는 축산 분뇨를 위탁 처리로 가정하였을 때의 수질 개선 효과를 분석하였으며 오염 저감 효율을 산정(Gyeonggi Development Institute, 2009)하여 축산농가에서의 오염부하 저감 효율을 분석하였다. 또한 산업계 시나리오(시나리오 3)로 폐수 방류 개별처리 시설 연계에 따른 수질 개선 효과를 분석하였다. 달천유역 내 오염우심지역인 음성천과 요도천 소권역의 경우 크고 작은 산업단지가 많이 위치해 있다. 폐수배출량이 가장 큰 1종 사업장의

경우 요도천 소권역에 2개소가 위치해 있으며 2종 사업장의 경우 음성천 소권역에 1개소 위치한 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 실제 산업계 전수조사 결과와 운영중인 산업계 시설 현황을 반영한 유역 모델을 통해 개별처리시설과 공공하수처리시설 연계에 따른 오염부하 저감 효과를 분석하였다. 산업계 시설 중 공공폐수처리시설의 방류수 수질기준 및 개인하수처리시설의 방류수 수질기준(「하수도법」제3조제1항제3호)에 명시된 기준으로 BOD<sub>5</sub> 농도가 10 mg/L 이상인 처리장을 근처 폐수처리장에 연계처리하고 10 mg/L 이하인 처리장은 원래대로 개별처리하여 개선되는 수질 분석을 수행하였다. 또한 토지계 시나리오(시나리오 4)로 표준시비량 시비 및 농업 최적관리 적용에 따른 수질 개선 효과를 분석하였다. 달천 유역의 경우 지자체 내 공공하수처리시설이 존재하지 않거나 분뇨를 개별처리하는 경우 개별적으로 퇴비화하여 시비하는 경우가 많은 것으로 조사되었다. 이에 달천 유역의 경우 농경지에 과도하게 퇴비를 시비하는 경우에 대비하여 농촌진흥청에서 제안하는 표준시비량 적용에 따른 수질 개선 효과를 분석하였다. 논과 밭에 밀가루로 2월 1일에 퇴비를 시비하였으며, 4월 1일에 질소와 인 계열 화학비료를 시비하였다. 새끼칠거름으로 6월 15일, 이삭거름으로 8월 15일에 질소 계열 화학비료를 각각 시비하였다. 또한 경작지에서 발생하는 농업 비점오염원을 줄이기 위하여 논과 밭에서의 최적관리 방안을 적용하여 수질 개선 효과를 분석하였다. 또한 복합 시나리오(시나리오 5)로 생활계, 축산계, 산업계 그리고 토지계에서 발생하는 오염부하량을 저감할 수 있는 복합적인 오염 저감 시나리오를 구성하고 시나리오 적용에 따른 수질 개선 효과를 분석하였다(시나리오 1~4).

생활계를 제외한 오염저감 시나리오는 오염우심지역과 달천 전체 유역을 대상으로 수행하였으며, 생활계 시나리오에 대해서는 소권역별 주된 오염원 현황을 반영하여 오염우심지역을 대상으로 모의하였다. 생활계 시나리오는 하수 미처리구역의 하수발생량과 물 사용량 절감을 위한 하수처리장 유입수 절감을 적용하였으며, 적용 대상 소유역은 달천하류 소권역이다. 축산계 시나리오의 경우 축사에 비가림시설과 유출방지턱 설치 및 달천 유역 내 가축두수 상위 20% 축산농가의 축분을 위탁처리를 적용하였으며, 적용 대상 소유역은 음성천, 요도천, 달천하류 소권역이다. 산업계 시나리오의 경우 개별처리 사업시설을 산업폐수처리장 및 공공하수처리시설에

연계처리를 적용하였으며 적용 대상 소유역은 음성천, 요도천, 달천하류 소권역이다. 토지계 시나리오에는 대상 지역에 대해 표준시비량을 적용하고 논외의 경우 물꼬관리와 완효성 비료, 밭의 경우 벧짚피복과 초생대를 적용하였으며 적용 대상 지역은 음성천, 요도천, 달천하류 소권역이다. 그리고 복합 시나리오에는 생활계, 축산계, 산업계, 토지계 시나리오를 모두 적용하였으며 마찬가지로 음성천, 요도천, 달천하류 소권역을 대상으로 적용하였다. 본 연구에서는 이러한 4개 오염원 시나리오(생활계, 축산계, 산업계, 토지계)와 복합 시나리오 적용에 따른 영향을 1) 전체 유황 개선 효과, 2) 홍수기, 풍수기 개선 효과, 3) 평수기, 저수기, 갈수기 개선 효과로 구분하여 각 오염원에 따른 유황별 수질 개선 효과를 분석하였다.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1 모델 적용성 평가 결과

Fig. 2는 달천 유역의 보정 지점을 나타낸 그림이다. E는 음성천, Y는 요도천, D1은 달천하류 소권역의 상류, D2는 달천하류 소권역의 하류이자 달천 전체 유역의 말단을 나타낸다. Table 3~4는 SWAT 모델을 통해 모의한 유입 하천별 유량과 수질항목별 보정 결과를 나타낸다. 이 때 달천하류의 경우 두 개의 지류가 합쳐져 달천 본류로 합류하기 때문에 ‘달천하류\_하’와 ‘달천하류\_상’ 두 개의 측정 지점별로 나누어 보정을 진행하였다. 각 지점별 적용 매개변수는 Table 5와 같다. 보정 결과, 음성천 유역의 유량에 대한  $R^2$ , NSE는 0.71, 0.73,  $BOD_5$  항목에 대한  $R^2$ , NSE는 0.67, 0.52, T-N 항목에 대한  $R^2$ , NSE는 0.85, 0.81, T-P 항목에 대한  $R^2$ , NSE는 0.82, 0.41로 나타났다. 요도천 유역의 유량에 대한  $R^2$ , NSE는 0.73, 0.67,  $BOD_5$  항목에 대한  $R^2$ , NSE는 0.73, 0.65, T-N 항목에 대한  $R^2$ , NSE는 0.65, 0.43, T-P 항목에 대한  $R^2$ , NSE는 0.68, 0.49로 나타났다. 달천하류\_상 유역의 유량에 대한  $R^2$ , NSE는 0.67, 0.62,  $BOD_5$  항목에 대한  $R^2$ , NSE는 0.81, 0.61, T-N 항목에 대한  $R^2$ , NSE는 0.67, 0.59, T-P 항목에 대한  $R^2$ , NSE는 0.62, 0.43로 나타났다. 달천하류\_하 유역의 경우 유량에 대한  $R^2$ , NSE는 0.79, 0.70,  $BOD_5$  항목에 대한  $R^2$ , NSE는 0.69, 0.67, T-N 항목에 대한  $R^2$ , NSE는 0.67, 0.62, T-P 항

목에 대한  $R^2$ , NSE는 0.54, 0.45로 나타났다(Table 3~4, Fig. 3~6). 보정 결과는 Moriasi et al. (2015)가 제안한 기준에 따

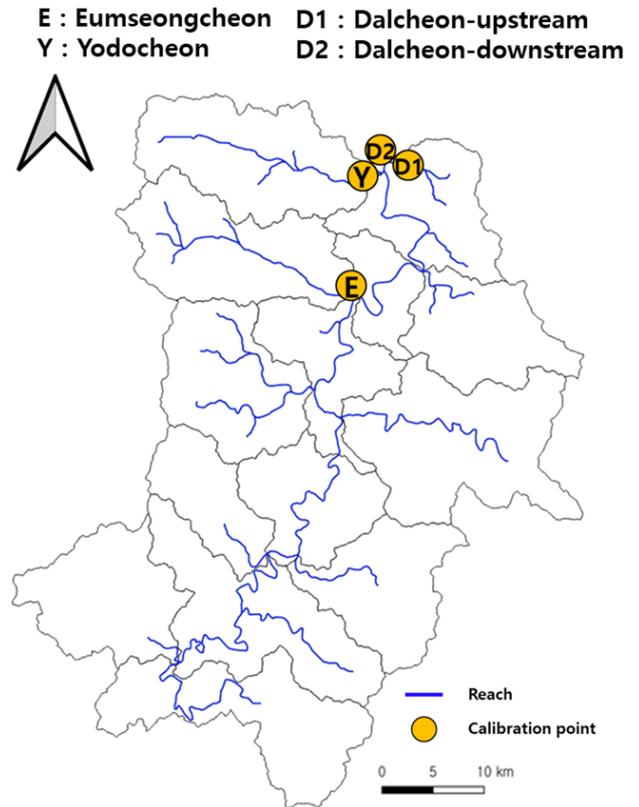


Fig. 2. Location of calibration point in Dalcheon watershed.

Table 3. Results of flow calibration at the Dalcheon basin

	Eumseongcheon	Yodocheon	Dalcheon downstream_upper	Dalcheon downstream_lower
$R^2$	0.71	0.73	0.67	0.79
	Satisfactory	Satisfactory	Satisfactory	Good
NSE	0.66	0.67	0.62	0.70
	Satisfactory	Satisfactory	Satisfactory	Satisfactory

Table 4. Results of water quality calibration at the Dalcheon basin

Watersheds	$BOD_5$		T-N		T-P	
	$R^2$	NSE	$R^2$	NSE	$R^2$	NSE
Eumseongcheon	0.67	0.52	0.85	0.81	0.82	0.41
	Satisfactory	Satisfactory	Very Good	Very Good	Very Good	Satisfactory
Yodocheon	0.73	0.65	0.65	0.43	0.68	0.49
	Good	Good	Good	Satisfactory	Good	Satisfactory
Dalcheon downstream_upper	0.81	0.61	0.67	0.59	0.62	0.43
	Good	Good	Good	Good	Satisfactory	Satisfactory
Dalcheon downstream_lower	0.69	0.67	0.67	0.62	0.54	0.45
	Satisfactory	Good	Good	Good	Satisfactory	Satisfactory

라 아주 좋음(Very good), 좋음(Good), 만족(Satisfactory), 불만족(Unsatisfactory)으로 구분하여 평가하였으며 유역 모델에서 모의된 하천별 전체 모의 기간에 대한 유량 및 수질은 대체적으로 실측값을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다. 제시된 모델 효율 범위와 신뢰 구간의 기준에 따라 유량 및 수질 항목 모두 전반적으로 “Satisfactory” 이상으로 모의치에 대한 보정이 잘 이루어진 것으로 판단된다.

3.2 유역 특성을 고려한 저감 효율 (소유역별/유역전체)

본 연구에서는 달천 유역을 대상으로 유역 특성을 고려한 오염원별 저감 시나리오를 구성하였으며 유역별, 유황별 저감 효율을 분석하였다. 전체 시나리오에 대해 모든 분석 결과에서 저감효율이 발생하였으나, 이는 동일한 저감 효율일지라도 부하량에 따라 효율의 정도가 다를 수 있으므로 Fig. 7에 각 소유역별 BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P의 시나리오 적용 전 오염 부하량을 나타내었다.

Table 5. Parameters calibrated for each watershed (Eumseongsheon, Yodocheon, Dalcheon-up, downstream)

Parameter	E <sup>1)</sup>	Y <sup>2)</sup>	D1 <sup>3)</sup>	D2 <sup>4)</sup>	Variation Method	Description
ALPHA_BF	-	1	0.6	0.6	Replace by Value	Baseflow alpha factor (1/days)
CN2	1.1	1.1	1.6	0.7	Multiply by Value	Initial SCS runoff curve number for moisture condition II
CH_K2	311	283	10	22.7	Replace by Value	Effective hydraulic conductivity in the main channel alluvium (mm/hr)
SOL_AWC	1.7	1.7	0.8	1.4	Multiply by Value	Available water capacity of the soil layer [mm/mm]
SOL_K	1.5	1.5	0.8	1.1	Multiply by Value	Saturated hydraulic conductivity [mm/hr]
REVPMPN	385	4764.2	750	-	Replace by Value	Threshold depth of water in the shallow aquifer for “revap” to occur [mm]
GW_REVAP	0.1	0.2	-	-	Replace by Value	Groundwater “revap” coefficient
GWQMN	4,743	4,764.2	3,900	4886.4	Replace by Value	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur [mm]
GW_DELAY	264	320.5	55	24.2	Replace by Value	Groundwater delay [days]
RS3	-	-	-	0.5	Replace by Value	Benthic source rate for NH <sub>4</sub> -N in the reach at 20°C [mg/(m <sup>2</sup> .day)]
RS4	-	-	-	0.1	Replace by Value	Rate coefficient for organic N settling in the reach at 20°C [1/day]
RS5	0.1	0.1	-	-	Replace by Value	Organic phosphorus settling rate in the reach at 20°C [1/day]
RS1	0.2	-	-	-	Replace by Value	Local algal settling rate in the reach at 20°C [m/day]
RK1	-	-	-	3.4	Replace by Value	Carbonaceous biological oxygen demand deoxygenation rate coefficient
BC1	0.6	-	-	0.7	Replace by Value	Rate constant for biological oxidation of NH <sub>4</sub> to NO <sub>2</sub> in the reach at 20°C [1/day]
BC2	1.1	-	-	1.8	Replace by Value	Rate constant for biological oxidation of NO <sub>2</sub> to NO <sub>3</sub> in the reach at 20°C [1/day]
USLE_P	0.1	0.1	-	0.1	Replace by Value	USLE equation support practice factor
USLE_K	0.1	-	-	0.1	Replace by Value	USLE equation soil erodibility (K) factor
PRF_BSN	0.7	0.7	-	-	Replace by Value	Peak rate adjustment factor for sediment routing in the main channel
PPERCO	13.2	13.2	-	-	Replace by Value	Phosphorus percolation coefficient
PSP	0.1	0.1	-	-	Replace by Value	Phosphorus sorption coefficient
ERORGN	3.5	3.5	-	0	Replace by Value	Organic N enrichment ratio
ERORGP	3.3	-	-	-	Replace by Value	Organic P enrichment ratio
EPCO	-	0.1	-	-	Replace by Value	Plant uptake compensation factor
ESCO	0.3	0.2	0.9	-	Replace by Value	Soil evaporation compensation factor
CH_ONCO	3	3	-	45.2	Replace by Value	Organic nitrogen concentration in the channel [ppm]
LAT_ORGN	2.3	-	-	-	Replace by Value	Organic N in the base flow (mg/l)
LAT_TTIME	94	147.3	10	-	Replace by Value	Lateral flow travel time [days]
SHALLST_N	6	6	-	747	Replace by Value	Concentration of nitrate in groundwater contribution to streamflow from subbasin [mg/l]
SLSOIL	60	52.7	40	-	Multiply by Value	Slope length for lateral subsurface flow
SURLAG	20	10	12	-	Replace by Value	Surface runoff lag time [days]

<sup>1)</sup>Eumseongsheon, <sup>2)</sup>Yodocheon, <sup>3)</sup>Dalcheon-upstream, <sup>4)</sup>Dalcheon-downstream

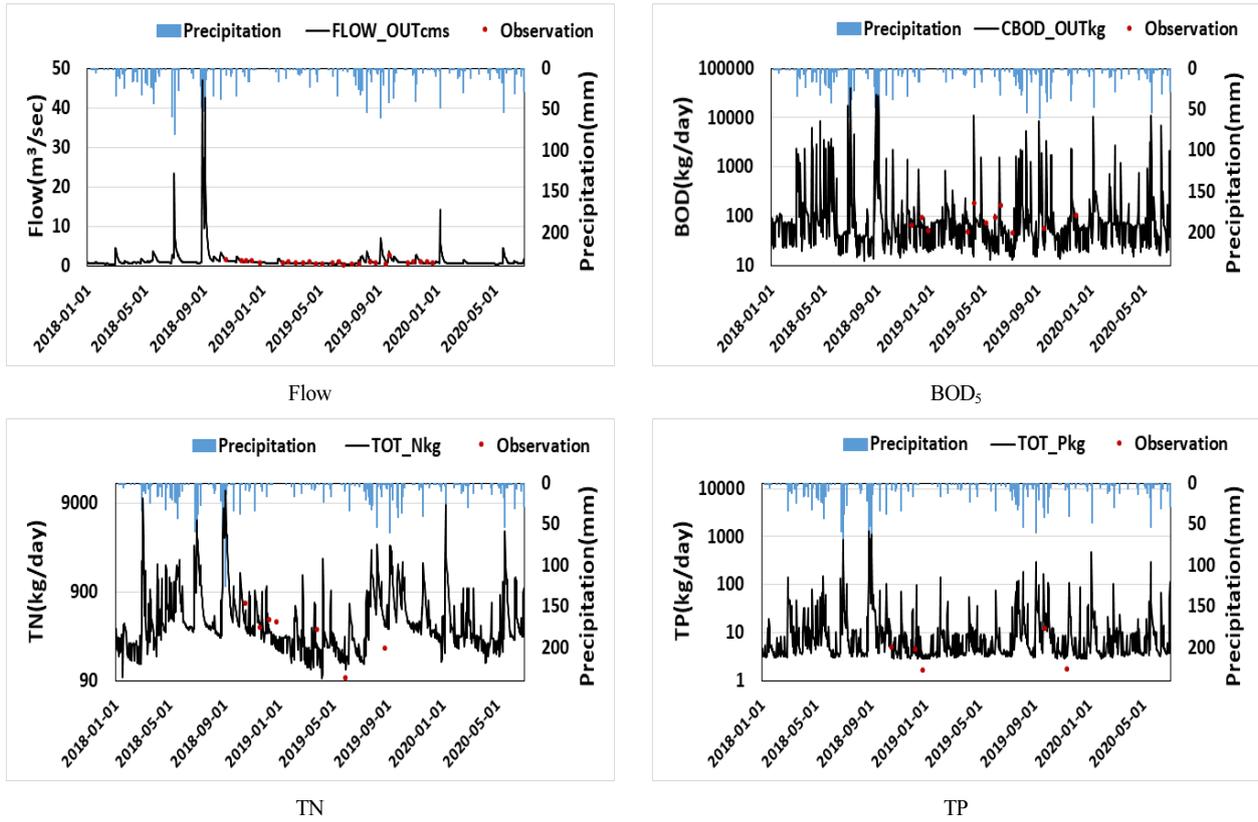


Fig. 3. SWAT model applicability evaluation results (Eumseongcheon).

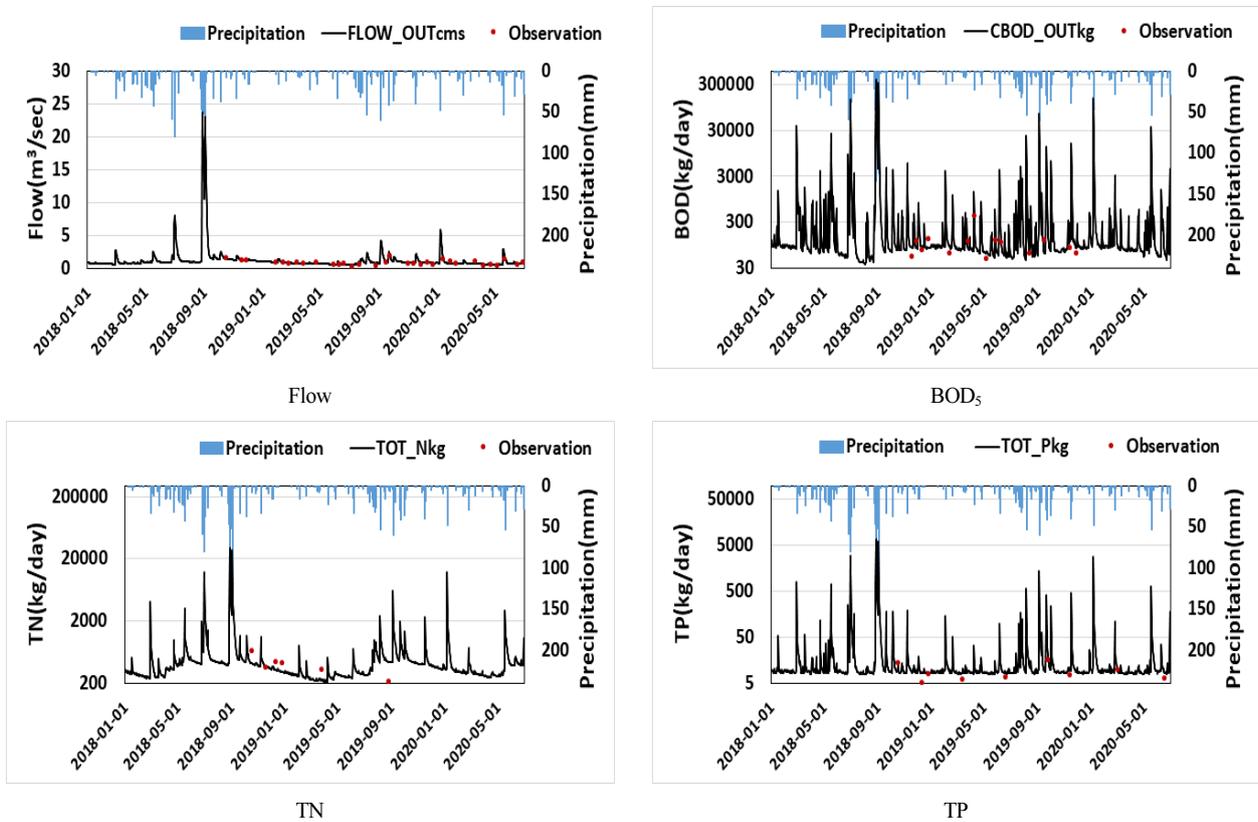


Fig. 4. SWAT model applicability evaluation results (Yodocheon).

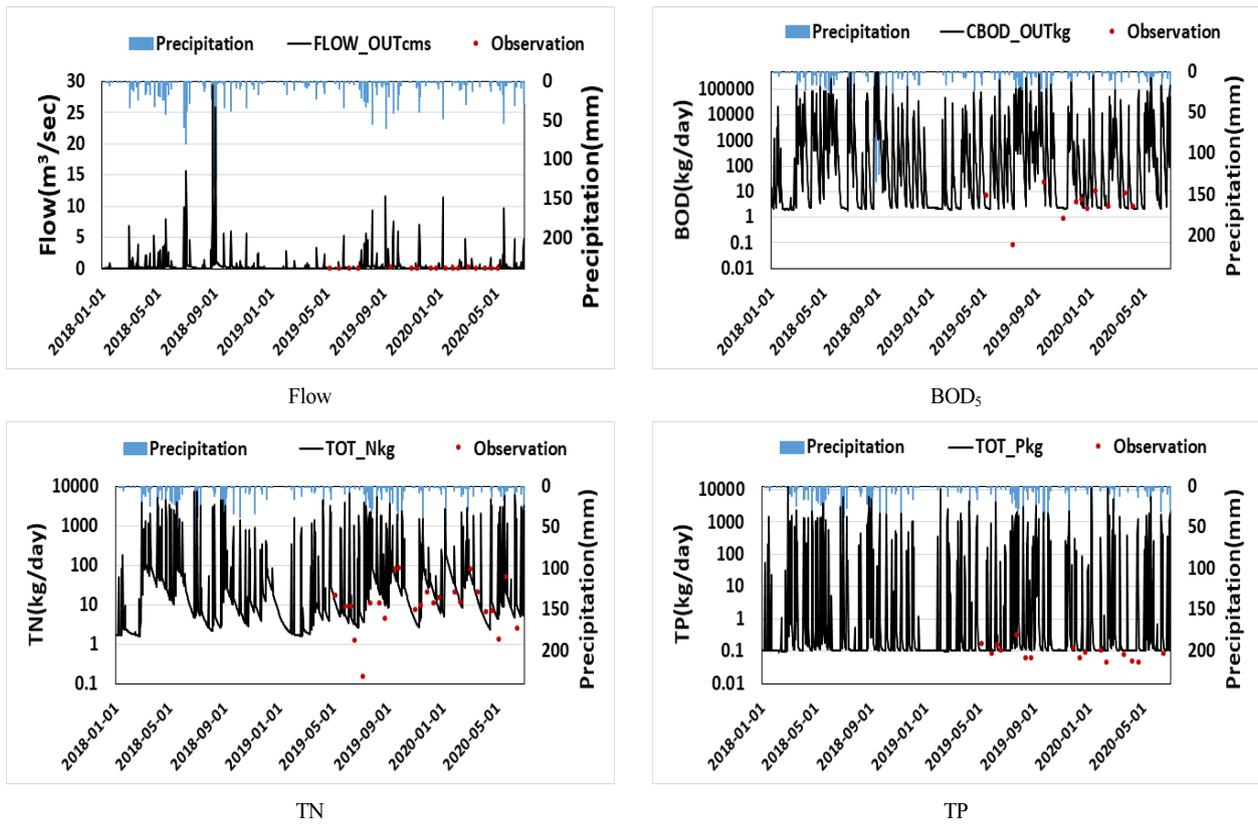


Fig. 5. Applicability evaluation result (Dalcheon downstream\_upper).

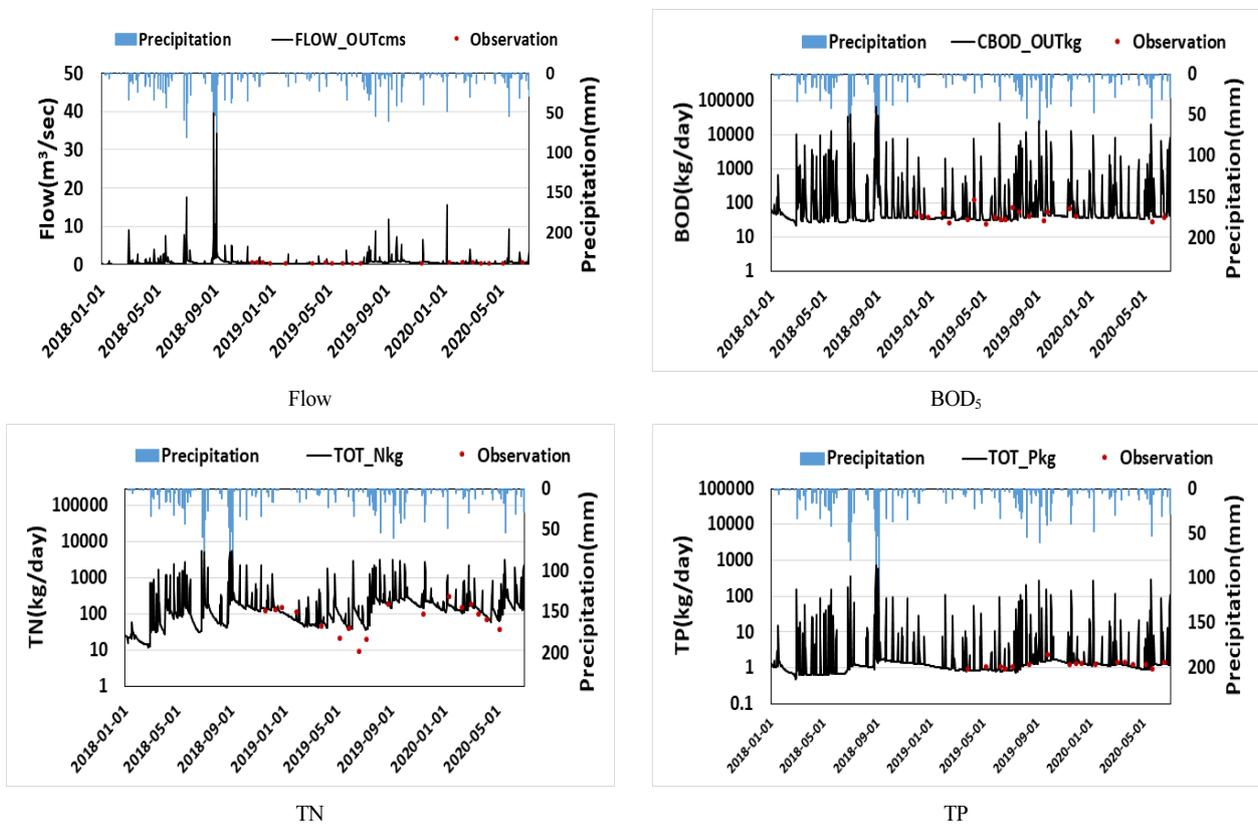


Fig. 6. Result of SWAT model applicability evaluation result (Dalcheon downstream\_lower).

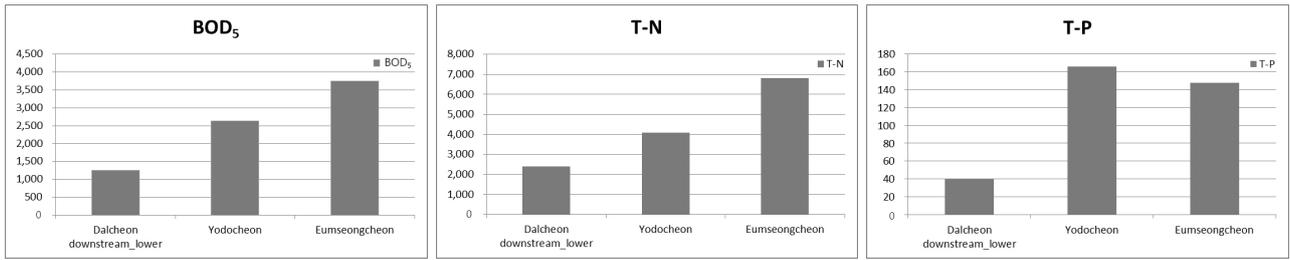


Fig. 7. Pollution load by subwatershed (BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P).

3.2.1 우심유역 내 마을하수도 연계 처리에 따른 수질 개선 효과 (시나리오 1)

달천 유역의 말단에서 생활계 시나리오를 적용한 후 오염 저감 효율을 분석한 결과, 전체 유황에서는 BOD<sub>5</sub>가 0.29%, T-N이 0.46%, T-P가 0.18% 저감된 것으로 나타났으며, 홍수기, 풍수기의 수질 개선 효과를 살펴보면, BOD<sub>5</sub>가 0.06%, T-N은 0.16%, T-P가 0.06% 저감된 것으로 분석되었다. 또한 평수기, 저수기, 갈수기 수질 개선 효과를 살펴보면, BOD<sub>5</sub>가 5.62%, T-N은 1.97%, T-P가 2.38% 저감된 것으로 분석되었다(Table 6). 여기서, 전체 유황은 All flow regime, 홍·풍수기는 Moist conditions, 평·저·갈수기는 Mid-dry conditions로 나타내었으며, 달천하류 소유역은 달천 유역 전체의 말단과 같다.

3.2.2 분뇨 배출 방지 시설 설치 및 사육두수 상위 20% 위탁처리에 따른 수질 개선 효과 (시나리오 2)

축산계 시나리오를 적용한 후 달천유역 내 시설 개선 및 위탁처리에 따른 전체 유황 구간에 대한 장기 연평균 수질 개선 효과를 살펴보면, 유역 말단에서는 BOD<sub>5</sub> 0.11%, T-N 0.25%, T-P 0.28% 저감된 것으로 분석되었다. 음성천에서는 BOD<sub>5</sub> 0.16%, T-N 0.25%, T-P 0.69% 저감된 것으로 분석되었으며, 요도천에서는 BOD<sub>5</sub> 0.49%, T-N 2.16%, T-P 4.78% 저감된 것으로 나타났다. 유황별로 살펴보면 홍수기, 풍수기에 대한 수질 개선 효과를 분석한 결과, 유역 말단에서 BOD<sub>5</sub> 0.09%, T-N 0.16%, T-P 0.14% 저감된 것으로 분석되었다. 음성천에서는 BOD<sub>5</sub> 0.11%, T-N 0.21%, T-P 0.50% 저감된 것으로

분석되었으며, 요도천에서는 BOD<sub>5</sub> 0.27%, T-N 1.47%, T-P 2.34% 저감된 것으로 산정되었다. 또한 평수기, 저수기, 갈수기에 대한 수질 개선 효과를 분석한 결과, 유역 말단에서 BOD<sub>5</sub> 0.71%, T-N 0.71%, T-P 3.05% 저감된 것으로 분석되었으며, 음성천에서는 BOD<sub>5</sub> 0.47%, T-N 0.33%, T-P 1.51% 저감된 것으로 나타났다. 요도천 유역의 경우 다수의 축산농가가 위치해있기 때문에 BOD<sub>5</sub> 6.80%, T-N 3.65%, T-P 24.62%로 가장 높은 저감 효과를 보였다(Table 7). 전체적으로 평수기, 저수기, 갈수기 기간의 경우 전체 유황 구간 및 홍수기, 풍수기 기간에 비해 상대적으로 높은 효율을 나타내는 것으로 분석되었다.

3.2.3 폐수 방류 개별처리시설 공공하수처리시설 연계에 따른 수질 개선 효과 (시나리오 3)

산업계 시나리오를 적용에 따른 산업폐수처리장 연계처리를 통한 수질 개선 분석 결과, 유역 말단에서는 BOD<sub>5</sub> 0.34%, T-N 0.68%, T-P 0.33% 저감된 것으로 분석되었다. 음성천에서는 BOD<sub>5</sub> 0.79%, T-N 1.41%, T-P 6.30% 저감된 것으로 분석되었으며, 요도천에서는 BOD<sub>5</sub> 0.84%, T-N 3.54%, T-P 2.39% 저감된 것으로 산정되었다.

그리고 홍수기, 풍수기 기간에 대한 수질 개선 효과를 분석한 결과, 유역 말단에서 BOD<sub>5</sub> 0.23%, T-N 0.39%, T-P 0.17% 저감된 것으로 분석되었다. 음성천에서는 BOD<sub>5</sub> 0.58%, T-N 1.25%, T-P 4.82% 저감된 것으로 나타났다. 요도천에서는 BOD<sub>5</sub> 0.51%, T-N 2.42%, T-P 1.13% 저감된 것으로 산정되었다. 또한 평수기, 저수기, 갈수기 기간에 대한 수질 개선 효

Table 6. Reduction efficiency of the living scenario at the Dalcheon watershed (Scenario 2) (unit: %)

watersheds	All flow regime			Moist conditions			Mid-dry conditions		
	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P
Dalcheon downstream	0.29%	0.46%	0.18%	0.06%	0.16%	0.06%	5.62%	1.97%	2.38%

Table 7. Reduction efficiency of the livestock scenario at the Dalcheon watershed (Scenario 2) (unit: %)

watersheds	All flow regime			Moist conditions			Mid-dry conditions		
	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P
Dalcheon downstream	0.11%	0.25%	0.28%	0.09%	0.16%	0.14%	0.71%	0.71%	3.05%
Eumseongcheon	0.16%	0.25%	0.69%	0.11%	0.21%	0.50%	0.47%	0.33%	1.51%
Yodocheon	0.49%	2.16%	4.78%	0.27%	1.47%	2.34%	6.80%	3.65%	24.62%

과를 분석한 결과, 전체적으로 평수기, 저수기, 갈수기 기간이 전체 유황 및 홍수기, 풍수기 기간에 비해 상대적으로 높은 효율을 나타내는 것으로 분석되었다. 유역 말단에서 BOD<sub>5</sub> 3.04%, T-N 2.15%, T-P 3.40% 저감된 것으로 나타났으며, 산업시설이 많이 분포되어 있는 요도천에서 BOD<sub>5</sub> 2.16%, T-N 1.77%, T-P 12.81% 저감된 것으로 분석되었다. 음성천에서는 BOD<sub>5</sub> 10.71%, T-N 5.93%, T-P 12.62% 저감된 것으로 분석되었다(Table 8). Ha et al. (2017)의 연구에 따르면 유황별 수질 분석 결과 홍수기에서 갈수기로 가면서 수질은 점차 높게 나타났으며, 조건에 따른 수질 변화는 유황에 따라 다르게 나타났다. 본 연구에서 수행한 생활계, 축산계, 산업계 시나리오 분석 결과에서도 유황별로 오염 저감 효율을 분석한 결과 홍·풍수기보다 평·저·갈수기의 수질이 높아져 저감 효율이 전반적으로 더 높게 나타나는 것을 확인하였다. 다만, 유역별로 저감효과가 다소 차이를 보였는데, 이는 유역 내 오염원 분포 및 유량이 상이하여 유황별 오염원 저감 효과가 다르게 나타나는 것으로 판단된다.

**3.2.4 표준시비량 시비 및 농업 최적관리 적용에 따른 수질 개선 효과 (시나리오 4)**

논에서의 물꼬 관리의 경우 관행 대비 저감 효율이 T-N의 경우 24%, T-P의 경우 34%로 알려졌으며, 완효성 비료 사용 시 저감 효율은 T-N, T-P 모두 22% 정도이다. 이에 본 연구에서도 논에서의 수질 저감 효율을 분석하기 위해 농어촌연구원에서 제시한 물꼬관리와 완효성 비료와 관련된 수질 개선 효율을 적용하여 그 효과를 분석하였다(RRI, 2016). 밭에서의 수질 오염원 저감을 위한 대책으로는 경사도 10% 이상인 밭에 대해 초생대와 벧짚 피복을 적용하여 이에 따른 수질 개선 효과를 유역 단위로 분석하였다. 초생대는 농경지의 말단부에 띠 모양으로 설치된 식생대로 농경지에서 발생한 유사 및 오염원 저감에 효과적인 것으로 알려져 있으며(Lee et al., 2011), 벧짚 피복은 지표층을 벧짚으로 피복하여 토양층으로의 침투량을 증가시키고 빗방울 타격에 의한 토양 입자의 이탈을 감소시킨다.

토지계 시나리오 적용에 따른 효율 분석을 위해 표준시비량 및 논과 밭에서의 오염저감 시나리오를 분석한 결과, 유역 말단에서 BOD<sub>5</sub> 29.31%, T-N 9.56%, T-P 24.68% 저감된 것으로 분석되었다. 음성천에서는 BOD<sub>5</sub> 13.58%, T-N 16.15%, T-P 29.00%가 저감된 것으로 분석되었다. 요도천에서는 BOD<sub>5</sub> 39.59%, T-N 26.45%, T-P 34.29% 저감된 것으로 나타났다. 또한 홍수기, 풍수기 기간에 대한 수질 개선 효과를 분석한 결과, 유역말단에서 BOD<sub>5</sub> 29.69%, T-N 9.45%, T-P 24.74% 저감된 것으로 분석되었다. 음성천에서는 BOD<sub>5</sub> 13.68%, T-N 16.51%, T-P 30.55% 저감된 것으로 분석되었으며, 요도천에서는 BOD<sub>5</sub> 38.45%, T-N 27.92%, T-P 36.84% 저감된 것으로 나타났다. 또한 평수기, 저수기, 갈수기 기간에 대한 수질 개선 효과를 분석한 결과, 대체적으로 전체 유황 및 홍수기, 풍수기 기간에 비해 상대적으로 낮은 효율로 분석되었다. 유역 말단에서 BOD<sub>5</sub> 20.22%, T-N 10.08%, T-P 23.69% 저감된 것으로 나타났다. 음성천에서 BOD<sub>5</sub> 12.91%, T-N 15.34%, T-P 17.81% 저감된 것으로 나타났으며 달천하류에서는 BOD<sub>5</sub> 12.11%, T-N은 23.32%, T-P 13.56% 저감된 것으로 산정되었다(Table 9). Park and Kwon (2014)의 연구에 따르면 초생대의 폭별 T-P 저감 효율을 분석한 결과 17.4~28.0%의 저감 효과를 보였으며, 초생대 폭의 증가는 점차 낮은 효율을 나타내었다. 본 연구에서는 초생대를 포함한 논과 밭에서의 최적관리기법을 복합적으로 적용하였으며, 이에 따른 달천 유역의 저감 효율은 전체 유황 및 홍수기, 풍수기의 경우 평균적으로 약 29%, 31%로 초생대만 적용했을 때보다 대체적으로 높게 산정되는 것을 알 수 있었다. 다만, 완효성 비료와 벧짚 피복의 유황별 수질 오염 저감 효과에 대한 연구가 부족한 실정이므로 다른 문헌과의 유황별 저감 효과에 대한 비교·분석에 한계가 있으나, 향후 유황별 저감 효율을 분석한 다양한 연구에서 본 연구의 결과가 비교 지표로 활용될 수 있을 것이라 판단된다. 본 연구 결과는 초생대와 벧짚 피복을 복합적으로 적용하였을 때의 BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P 수질 항목에 대한 저감 효과를 유황별로 분석한 데 의의가 있다.

**Table 8.** Reduction efficiency of an industrial scenario at the Dalcheon watershed (Scenario 3) (unit: %)

watersheds	All flow regime			Moist conditions			Mid-dry conditions		
	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P
Dalcheon downstream	0.34%	0.68%	0.33%	0.23%	0.39%	0.17%	3.04%	2.15%	3.40%
Eumseongcheon	0.79%	1.41%	6.30%	0.58%	1.25%	4.82%	2.16%	1.77%	12.81%
Yodocheon	0.84%	3.54%	2.39%	0.51%	2.42%	1.13%	10.71%	5.93%	12.62%

**Table 9.** Reduction efficiency of land scenario at the Dalcheon watershed (Scenario 4) (unit: %)

watersheds	All flow regime			Moist conditions			Mid-dry conditions		
	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P
Dalcheon downstream	29.31%	9.56%	24.68%	29.69%	9.45%	24.74%	20.22%	10.08%	23.69%
Eumseongcheon	13.58%	16.15%	29.00%	13.68%	16.51%	31.55%	12.91%	15.34%	17.81%
Yodocheon	37.59%	26.45%	34.29%	38.45%	27.92%	36.84%	12.11%	23.32%	13.56%

Table 10. Reduction efficiency of combined scenario at the Dalcheon watershed (Scenario 5)

(unit: %)

watersheds	All flow regime			Moist conditions			Mid-dry conditions		
	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P	BOD <sub>5</sub>	T-N	T-P
Dalcheon downstream	29.8%	10.3%	25.2%	29.9%	9.8%	24.9%	25.8%	12.8%	29.1%
Eumseongcheon	13.7%	16.4%	29.7%	13.8%	16.7%	32.1%	13.4%	15.7%	19.3%
Yodocheon	38.1%	28.6%	39.1%	38.7%	29.4%	39.2%	19.0%	27.0%	38.2%

### 3.2.5 다양한 저감 사업 적용에 따른 복합적 수질 개선 효과 (시나리오 5)

생활계, 축산계, 산업계 그리고 토지계 오염 저감 시나리오를 복합적으로 적용한 시나리오 5의 수질 개선 효과를 분석한 결과, 유역 말단에서는 BOD<sub>5</sub> 29.75%, T-N 10.29%, T-P 25.15% 효과가 있는 것으로 분석되었다. 음성천에서는 BOD<sub>5</sub> 13.74%, T-N 16.40%, T-P 29.70%로 분석되었다. 요도천에서는 BOD<sub>5</sub> 38.08%, T-N 28.61%, T-P 39.07%로 분석되었다. 홍수기, 풍수기 기간에 대한 수질 개선 효과를 분석한 결과, 유역 말단에서 BOD<sub>5</sub>가 29.92%, T-N은 9.79%, T-P는 24.94%로 분석되었다. 음성천에서는 BOD<sub>5</sub> 13.80%, T-N 16.72%, T-P 32.05%로 분석되었으며, 요도천에서는 BOD<sub>5</sub> 38.73%, T-N 29.38%, T-P 39.18%로 산정되었다. 또한 평수기, 저수기, 갈수기 기간에 대한 수질 개선 효과를 분석한 결과, 유역 말단에서의 수질 개선 효율은 BOD<sub>5</sub> 25.75%, T-N 12.82%, T-P 29.14%로 나타났다. 음성천에서는 BOD<sub>5</sub> 13.39%, T-N 15.67%, T-P 19.32%로 분석되었으며, 요도천에서는 BOD<sub>5</sub> 18.95%, T-N 26.97%, T-P 38.17%로 산정되었다(Table 10).

## 4. Conclusion

최근 기후변화와 도시화로 인한 불투수 면적의 증가로 인해 오염물질 유출량이 계속 증가하여 수질 오염이 악화되고 있다. 또한 비점오염원 부하량이 큰 비중을 차지하므로 비점오염원을 효율적으로 관리하는 것이 매우 중요하다. 이에 기후변화의 영향을 받았을 뿐 아니라 남한강 본류 수질에도 영향을 미칠 수 있는 달천 유역을 대상으로 1) 주요 배출 오염원 특성 분석을 수행하고 2) 유역 특성에 맞는 비점오염 저감 대책을 구성하여 3) 유역별, 유황별 저감 효율 분석을 수행하였다.

본 연구에서는 유역의 특성을 반영한 오염원별 저감 시나리오를 구성하기 위해 달천 유역을 대상으로 발생/배출부하량 및 오염원 현황분석과 현장 조사를 통해 유역 내 주요 오염원과 오염원별 저감 방안을 SWAT 모형을 이용하여 모의하였으며 그에 따른 유황별 저감 효율 분석을 실시하였다. 생활계 오염원 저감 방안으로 하수 미처리 구역 하수 발생량 연계처리와 물사용량 절감을 통한 하수처리장 유입수 절감, 축산계 오염원 저감 방안으로 분뇨 배출 방지 시설인 비가림시설 및 유출방지터 설치, 산업계 오염원 저감 방안으로 개별처리시설 산업폐수처리장/공공하수처리시설 연계처리, 토지계 시나리오로 표준시비량과 논에서의 물꼬 관리와 완효성 비료와 밭에서의 빗집피복과 초생대 그리고 모든 오염저감방안을 적용하

는 복합 오염원 저감방안 시나리오를 설정하였다. 효율 분석은 전체 유황, 홍·풍수기, 평·저·갈수기로 구분하여 분석하였으며 모든 시나리오 분석 결과 생활계 시나리오의 경우 0.06~5.62%, 축산계 시나리오의 경우 0.09~24.62%, 산업계 시나리오의 경우 0.17~12.81%, 토지계 시나리오의 경우 9.45~38.45% 그리고 복합 시나리오의 경우 9.8~39.2%의 오염 저감효율을 나타내었다. 토지계 오염 저감 시나리오의 저감효율의 경우, 모든 수질 항목에 대해 생활계, 축산계, 산업계 시나리오의 저감 효율보다 최소 1.5배 이상 크게 나타났다. 따라서 복합 시나리오를 제외하고 토지계 오염 저감 시나리오가 가장 큰 수질 오염저감 효율을 나타내는 것으로 분석되었다.

또한 생활계, 축산계, 산업계 시나리오의 저감 효율 분석 결과 평·저·갈수기의 개선 효과가 풍·평수기의 개선 효과보다 높게 나타났으며, 토지계 시나리오의 저감 효율 분석 결과 풍·평수기의 개선 효과가 평·저·갈수기의 개선 효과보다 높게 나타났다. 생활계와 산업계 시나리오의 경우 하수처리시설 및 공공하수처리시설의 방류량이 하천 유량에 큰 부분을 차지하는 갈수기에 저감 효율이 크게 나타난 것으로 판단되며, 축산계 시나리오의 경우 하천 유량이 적은 갈수기에 가축 분뇨의 위탁 처리 효과가 크게 나타나는 것으로 판단된다. 토지계 시나리오의 경우 빗집피복 및 표준시비량을 적용했을 때, 빗방울 타격에 의한 토양 입자 이탈 방지와 강우 시 하천으로 유입되는 오염물질의 양이 감소되므로 풍·평수기의 저감 효율이 더 크게 나타나는 것으로 판단된다.

다만, 달천 유역 내 오염원 분포 및 오염 물질의 배출되는 특성에 따라 저감 효율이 다르게 나타날 수 있으며, 본 연구에서 구성한 오염 저감 시나리오 중 토지계 시나리오의 경우 국내 문헌에서 산정된 값을 참고하여 적용하였기 때문에 저감 효율에 대한 불확실성이 존재할 가능성이 있다. 따라서 향후 정확한 저감효율 분석을 위해서는 대상 유역 특성이 반영된 값을 이용한 모의가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 유역 특성에 맞는 오염원별 저감 시나리오 적용 및 유황별 분석을 수행하였다. 본 연구를 통해 달천 유역 특성을 고려한 오염 저감 시나리오의 유황별 저감 효과를 수치적으로 확인하였다. 이는 달천 유역의 갈수기 및 홍수기에 적합한 저감 방법을 모색하는 데 있어 기존의 방법대로 전체 유황에 대한 수질 개선 효과를 분석하는 것보다 효과적인 방법이라 판단된다. 또한 유황에 따른 비점오염원 저감 효율을 수치적으로 분석함으로써 달천 유역의 유황에 따른 효율적인 오염원 저감 방안 대책 마련에 기여할 수 있을 것이라 기대된다.

## Acknowledgement

- 본 논문은 한강수계관리위원회 환경기초조사사업 연구 수행의 일환으로 수행되었습니다.
- 본 논문은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2020003030004).

## References

- Arnold, J. G. and Allen, P. M. (1999). Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records 1, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 411-424.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- Choi, M., Jung, W., Choi, J., and Kim, Y. (2017). Water quality improvement plans based on the analysis of pollutant discharge characteristics and water quality modelling of Seokmun reservoir watershed, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 39(10), 581-590. [Korean Literature]
- Choi, Y., Kim, C., Kim, H., Oh, J., and Jeong, S. (2010). Characteristics of stormwater treatment in construction site, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, 11(6), 69-75. [Korean Literature]
- Gang, M. J. (2012). Directions for nonpoint pollution source research for improving nonpoint pollution source management policies, *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 54(4), 19-25. [Korean Literature]
- Gong, S. H. and Kim, T. G. (2018). Analysis of pollutants discharge due to the change of impervious land in urban area using watershed model, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 27(1), 73-82. [Korean Literature]
- Gyeonggi Development Institute. (2009). *A study on developing the effective management strategies for unregistered animal feeding operations*, Gyeonggi Development Institute. [Korean Literature]
- Ha, D. W., Kim, S. G., and Ko, G. Y. (2017). Evaluation of water quality change by flow duration conditions and hydrometry frequency, *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*, 18(6), 617-624. [Korean Literature]
- Han-river Regional Environmental Office. (2018). *Pollution characteristics and pollution reduction plan during dry season of major tributaries flowing into South Han river*, Han-river Regional Environmental Office. [Korean Literature]
- Jeon, M., Choi, H., Kang, H., and Kim, L. H. (2020). Assessment of water and pollutant mass balance by soil amendment on infiltration trench, *Journal of Wetlands Research*, 22(2), 145-152. [Korean Literature]
- Jeong, W. G., Huh, I. R., Lee, G. H., Kim, S. H., Bae, C. M., Park, U. J., Choi, S. B., and Lim C. C. (2017). Analysis of water quality improvement effects in a muddy water occurrence stream during rainfall, *Journal of Korean Society for Environmental Analysis*, 20(1), 49-57. [Korean Literature]
- Ki, S. J., Park, H. G., Ahn, S. J., Yu, D. G., and Lee, C. S. (2019). Assessing water quality characteristics and pollution loads of agricultural pumping and drainage facilities as well as drainage facilities at the lower Nakdong river, *Journal of Korea Society of Water Science and Technology*, 27(6), 67-79. [Korean Literature]
- Kim, E. J., Park, B. K., Kim, Y. S., Rhew, D. H., and Jung, K. W. (2015). A study on development of management targets and evaluation of target achievement for non-point source pollution management in Saemangeum watershed, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 37(8), 480-491. [Korean Literature]
- Kim, I. J., Son, K. H., and Kim, J. K. (2007). Evaluating the trapping efficiency of vegetative buffer systems on sediment reduction using SWAT model, *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, Korea Water Resources Association, 1819-1823. [Korean Literature]
- Kim, J. S., Choi, J. Y., Lee, J. M., Na, E. H., Shin, D. S., Lee, J. K., and Ryu, J. C. (2019). A study on the plan for selection of prioritization management area for reduction of non-point pollution in Gwangju metropolitan city, *Journal of Environment Policy and Administration*, 27, 189-214. [Korean Literature]
- Kim, J., Park, Y. S., Lee, S., Shin, Y., Lim, K. J., and Kim, K. S. (2017). Study of selection of regression equation for flow-conditions using machine-learning method: Focusing on Nakdonggang waterbody, *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 59(4), 97-107. [Korean Literature]
- Korea Meteorological Administration. (2015). *Korea Meteorological Administration*, <https://www.weather.go.kr> (accessed July. 2021).
- Lee, J. S. and Kim, C. G. (2019). Performance analysis for reduction facility of nonpoint source pollutant, *Journal of Korea Water Resources Association*, 52(3), 207-217. [Korean Literature]
- Lee, J. W., Eom, J. S., Kim, B. C., Jang, W. S., Ryu, J. C., Kang, H. W., Kim, K. S., and Lim, K. J. (2011). Water quality prediction at Mandae watershed using SWAT and water quality improvement with vegetated filter strip, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 53(1), 37-45. [Korean Literature]
- Lee, T. (2016). Assessment of sediment and total phosphorous loads using SWAT in Oenam watershed, Hwasun, Jeollanam-do, *Journal of the Korean association of regional geographers*, 22(1), 240-250. [Korean Literature]
- Lee, T. H., Cho, H. L., Park, S. E., Kim, Y. M., Kim, C. S., and Kim J. H. (2019). Estimation of land-based pollution loads to Jaranman · Saryang island areas for export using a watershed model, *Journal of the Korean Society for Marine*

- Environment & Energy*, 22(4), 226-235. [Korean Literature]
- Lim, S. J., Lim B. R., Lee, H. S., Kang, J. H., Ahn, T. U., and Shin, H. S. (2021). Evaluation on pollution load characteristics and influence of tributaries in the Hwangguji stream, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 37(4), 249-262. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2010). *Environmental Geographic Information Service (EGIS)*, <https://egis.me.go.kr> (accessed July. 2021).
- Ministry of Environment (ME). (2019). *2019 National pollution source survey data*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2020). *The 3rd comprehensive measures for the management of nonpoint pollution sources of rainfall runoff (2021~2025)*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2010). *National Geographic Information Institute*, <https://www.ngii.go.kr> (accessed July. 2021).
- 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*, 58(6), 1763-1785.
- National Institute of Agriculture Sciences. (2019). *Korean Soil Information System*, <http://soil.rda.go.kr> (accessed July. 2021).
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2005). *Development of Stream Water Quality Mode for Total Maximum Daily Load (II)*, TRKO201200011356, National Institute of Environmental Research, 28-30. [Korean Literature]
- Park, J. H., Ryu, J., Shin, D. S., and Lee, J. K. (2019). The effective approach for non-point source management, *Journal of Wetlands Research*, 21(2), 140-146. [Korean Literature]
- Park, Y. S. and Kwon, J. H. (2014). Application and effectiveness analysis of SWAT filter strip in Golji watershed, *Journal of Environmental Agriculture*, 33(1), 30-36. [Korean Literature]
- Rural Research Institute (RRI). (2019). *Agricultural nonpoint pollution control governance operation manual*, Rural Research Institute. [Korean Literature]
- Ryu, J. C., Kim, J. S., Choi, J. Y., Jang, H. S., Shin, D. S., Lee, J. K., and Na, E. H. (2018). Evaluation of the soil erosion mitigation through muddy water reduction project implementation in the Doam lake watershed non-point source management zone, *Environmental Policy and Administration*, 26(4), 1-19. [Korean Literature]
- Song, C. H., Lee, W. K., Choi, H. A., Jeon, S. W., Kim, J. U., Kim, J. S., and Kim, J. T. (2015). Application of InVEST water yield model for assessing forest water provisioning ecosystem service, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 18(1), 120-134. [Korean Literature]
- Wonju Regional Environmental Office. (2016). *Evaluation of implementation of water environment management plan in the middle-watershed*, Wonju Regional Environmental Office. [Korean Literature]
- Yoon, C. G., Shin, A. H., Jung, K. W., and Jang, J. H. (2007). A study on BASINS/WinHSPF for evaluation of non-point source reduction efficiency in the upstream of Nam-Han river watershed, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 23(6), 951-960. [Korean Literature]
- Yu, W. S., Lee, G. H., Park, C. H., Lee, B. H., and Jung, K. S. (2011). Analysis of rainfall-sediment yield-runoff prediction uncertainty due to propagation of parameter uncertainty, *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, Korea Water Resources Association, 282-286. [Korean Literature]