

HSPF를 이용한 농업비점오염원 최적관리방안에 따른 수질개선효과 예측

이경석* · 이동훈* · 안영미** · 강주현**

*동국대학교 건설환경공학과

**한국환경공단 수생태복원부

Predicting the Effects of Agriculture Non-point Sources Best Management Practices (BMPs) on the Stream Water Quality using HSPF

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

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

**Korea Environment Corpotation, Department of Aquatic Restoration, Incheon, South Korea

(Received : 4 April 2023, Revised : 1 May 2023, Accepted : 1 May 2023)

요약

농업지역에서 발생하는 비점오염물질은 타 지역에 비해 넓은 면적에서 배출되기 때문에 수질관리를 위해서는 발생원 제어와 배출수 관리와 같은 다양한 오염원 저감대책이 필요하며, 이를 위해서는 유역특성을 고려한 오염원별 배출량 및 최적관리방안에 따른 수질개선 효과를 정량적으로 파악할 필요가 있다. 이에 본 연구는 Hydrological Simulation Program-FORTRAN(HSPF)모델을 활용하여 유역내 오염원별 부하 및 주요 오염원저감방안에 대한 수질개선효과를 분석하여 농업지역의 비점오염관리대책 수립 지원을 목적으로 하였다. 연구지역은 경남 창원군 계성천 유역으로 전체 면적대비 농업지역이 약 26.13%로 산림을 제외하고 지배적인 토지이용을 가지며, 주요 오염원은 농업활동에 기인하는 화학비료 및 액비살포와 축사에서 발생하여 야적 또는 농지에 살포되는 축분을 포함하고 있다. 계성천 유역에 대한 HSPF 모델 구축시 화학비료와 액비 사용량, 소규모 축사의 축분 발생량과 공공하수처리장, 분뇨처리장, 마을하수도 및 개인오수처리시설 등 점오염원 영향을 고려하였다. 특히 본 연구에서는 영양염류의 식생흡수, 침적, 흡탈착, 깊은침투에 의한 손실 등 상세 순환기작모의가 가능하도록 NITR 및 PHOS모듈을 활용하였다. 구축된 모델은 유역말단의 2015~2020년 측정값을 토대로 보·검정을 수행하였으며 모델이 유량 및 수질을 적절히 모의하는 것을 확인하였다. 오염저감시나리오는 농업비점관리(배수물포관리, 완료성비료와 사용), 축산비점관리(액비저감, 소규모 축사 축분관리), 생활계오염원제어(개인오수처리시설 관리) 등 세 부분으로 구분하고, 달성기간에 따라 단기, 중기, 및 장기로 구분하여 부문별로 단계별 저감대책을 구성하였다. 개별시나리오 모의 결과 수질개선에 효과는 완료성비료의 대체사용>배수물포관리>소규모축사 축분관리 순으로 나타났다. 유역 전반에 모든 관리방안을 적용하였을 때 장기적으로 TN, TP의 연간부하량은 각각 40.6%, 41.1%, 연평균 농도는 각각 35.1%, 29.2% 감소되는 효과를 보였다. 본 연구를 통하여 농업활동 우세 유역에서의 다양한 오염원 저감시나리오별 수질개선효과에 대한 예측 및 이에 기반한 오염관리대책 우선순위 도출을 위한 합리적인 방법론을 제시하고자 한다.

핵심용어 : 완료성비료, 액비, HSPF, 비점오염원, 최적관리방안, 영양염류

Abstract

Non-point source (NP) pollutants in an agricultural land use are discharged from a large area compared to those in other land uses, and thus effective source control measures are needed. To develop appropriate control measures, it is necessary to quantify discharge load of each source and evaluate the degree of water quality improvement by implementing different options of the control measures. This study used Hydrological Simulation Program-FORTRAN (HSPF) to quantify pollutant discharge loads from different sources and effects of different control measures on water quality improvements, thereby supporting decision making in developing appropriate pollutant control strategies. The study area is the Gyeongsang river watershed in Changnyeong county, Gyeongsangnam-do,

*To whom correspondence should be addressed.

Department of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University-Seoul, Korea
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/Assistant professor (leedonghoon@dgu.ac.kr)
• **Youngmi Ahn** Korea Environment Corpotation, 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)

with agricultural areas occupying the largest proportion (26.13%) of the total area except for the forest area. The main pollutant sources include chemical and liquid fertilizers for agricultural activities, and manure produced from small scale livestock facilities and applied to agriculture lands or stacked near the facilities. Source loads of chemical fertilizers, liquid fertilizers and livestock manure of small scale livestock facilities, and point sources such as municipal wastewater treatment plants (WWTPs), community WWTPs, private sewage treatment plants were considered in the HSPF model setup. Especially, NITR and PHOS modules were used to simulate detailed fate and transport processes including vegetation uptake, nutrient deposition, adsorption/desorption, and loss by deep percolation. The HSPF model was calibrated and validated based on the observed data from 2015 to 2020 at the outlet of the watershed. The calibrated model showed reasonably good performance in simulating the flow and water quality. Five Pollutants control scenarios were established from three sectors: agriculture pollution management (drainage outlet control, and replacement of controlled release fertilizers), livestock pollution management (liquid fertilizer reduction, and manure management of small scale livestock facilities) and private STP management. Each pollutant control measure was further divided into short-term, mid-term, and long-term scenarios based on the potential achievement period. The simulation results showed that the most effective control measure is the replacement of controlled release fertilizers followed by the drainage outlet control and the manure management of small scale livestock facilities. Furthermore, the simulation showed that application of all the control measures in the entire watershed can decrease the annual TN and TP loads at the outlet by 40.6% and 41.1%, respectively, and the annual average concentrations of TN and TP at the outlet by 35.1% and 29.2%, respectively. This study supports decision makers in prioritizing different pollutant control measures based on their predicted performance on the water quality improvements in an agriculturally dominated watershed.

Key words : Best management practices (BMPs), Controlled release fertilizer, Hydrological Simulation Program-FORTRAN (HSPF), Liquid fertilizer, Non-point sources, Nutrients

1. 서 론

담수 환경에서 비점오염물질의 오염기여도는 점차 증가하고 있다(MOE, 2020). 비점오염물질의 종류와 특성은 토지이용에 크게 영향을 받으므로 해당 지역의 특성을 고려한 유역관리가 필요하다. 도시 및 산업지역은 도로 및 공장 등에서 기인한 중금속과 기름 물질이 특징적인 배출 물질이며(Kim et al., 2004) 농업지역은 화학비료, 축분 등에 기인한 토사, 영양물질, 유기물질이 주요한 오염원으로 알려져 있다(Son et al., 2014).

특히 농업지역의 경우 대부분 토지계 및 축산계에서 비점오염원이 발생하며 타 지역에 비해 넓은 면적에서 배출되어 유역내 전체 배출부하량 중 차지하는 비율이 상당히 높다(NIER, 2014; Park et al., 2019). 농업활동시 사용되는 화학비료는 질소와 인 등 영양물질이 주성분으로 작물 생장에 필요한 영양소를 공급해 준다. 그러나 일반적으로 행해지는 과다 시비에 따라 잉여 양분이 무기염류로의 변환된 후 기저유출 되거나, 토양에 흡착된 형태로 강우시 유실되어 수계로 유입된다(Lee et al., 1995). 축사에서 발생하는 축분의 경우 많은 경우 축사 인근에 야적된 후 필요에 따라 농경지에 투입되는데, 이 과정에서 강우에 의한 야적 축분의 표면 유출 또는 농경지 투입 후의 유출이 발생하여 수생태계에 악영향을 초래한다(Ahn et al., 2021).

농업지역 비점오염물질을 관리하는 방안은 대표적으로 발생원 제어와 배출수 관리로 구분할 수 있으며(Choi et al., 2017) 이와 같은 비점오염원관리대책을 수립하기 전 지속적인 모니터링을 통해 배출경로에 따른 오염물질의 배출량 및 배출특성을 파악할 필요가 있다. 그러나 인력 및

비용 등의 문제로 장기적인 모니터링은 한계가 있으므로 유역모델을 주로 활용하게 된다. 유역모델은 오염물질, 기상, 지형적 특성을 고려하여 유역내 오염물질의 거동 및 농도 분포를 파악하고 대책에 따른 수질개선효과 모의가 가능하여 최적의 관리방안을 도출하는데 활용된다. 유역모델은 유역의 특성과 모델링의 목적에 따라 다양한 모델이 개발되었으며 대표적으로 Hydrological Simulation Program-FORTRAN(HSPF), Soil & Water Assessment Tool(SWAT), Storm Water Management Model(SWMM) 등이 국내에서 많이 사용되고 있다(Park et al., 2020). 그 중 HSPF는 도시지역과 농업지역이 혼재된 복합토지이용에 적용가능하며 각종 오염원 저감 시나리오를 반영하기 용이하여(Bicknell et al., 2001) 국내 농업지역에서의 오염물질 배출과 수질변동을 파악하기 위해 많이 활용되고 있다. HSPF를 활용한 국내 연구사례를 살펴보면 Lee et al., (2018)은 농촌 유역에서의 농업용 저수지와 논 기작을 고려하기 위해 HSPF, MASA, CREAMS-PADDY모형을 연계하여 HSPF-MASA-CREAMS-PADDY연계시스템을 구축하여 그 적용성을 평가한 바 있으며 Jung et al., (2020)은 논 비점오염 배출량 산정을 위해 HSPF모델의 기본 모듈의 전달경로를 재구성한 HSPF Paddy-RCH기법을 개발하여 그 적용성을 평가한 바 있다. HSPF모델에서 오염물질의 배출 및 배출량을 모의할 때 PQUAL과 AGCHEM 두 섹션내 모듈을 활용하여 수행되는데(Richard et al., 2013) 국내에서는 일반적인 HSPF 활용연구시 오염물질의 거동을 블록화시켜 단순화된 방법으로 모의하는 PQUAL 모듈을 주로 사용해 왔다. 그러나 농업지역에서 배출되는 비료 및 퇴비의 공급, 식생에서의 영양물질 흡수 등 생물학적·화학적 순환기작을 고려하

지 못하는 어려움이 있다.

본 연구는 낙동강 유역에 위치한 계성천 소유역을 대상으로 HSPF모형을 활용하여 농업지역의 유출경로별 오염물질 저감대책에 대한 수질개선효과를 분석하고 향후 오염원 관리대책 수립시 기초자료로써 제공하고자 하였다. 유역내 화학비료, 액비, 축분의 발생 및 사용량을 산정하여 모델 구축시 반영하였으며 특정 관심물질의 상세한 모의가 가능한 AGCHEM섹션내 질소, 인 순환모듈(NITR, PHOS)을 활용하여 영양물질의 식생흡수, 흡탈착, 용해, 토양손실 등의 상세 거동 모의를 가능하도록 하였다. 구축된 모델을 토대로 유역내 오염특성에 따라 5개의 최적관리방안들로 구성하여 달성기간에 따른 단일 및 복합시나리오를 수립하여 그에 따른 수질 개선효과를 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상지역

본 연구대상지역은 경상남도 창녕군에 위치하고 있는 계성천 소유역이다. 유역내 주요 하천인 계성천은 창녕읍, 남지읍, 영산면, 도천면, 장마면에 걸친 유로연장 31.10 km의 지방하천으로 합천함안보 직상류지점에서 낙동강에 합류된다. 계성천 유역내 인구는 2020년 기준 약 32,203세대 63,634명이 거주하고 있으며(MOE, 2022) 유역면적은 96.00 km², 평균표고는 E.L. 196.80 m, 평균경사는 18.03°이며 평균 강수량은 1,110 mm으로 6월부터 9월까지 약 61.9%가 발생한다(Fig. 1).

유역내 토지이용현황은 산림지역 49.33%, 농업지역 26.13%, 시가지지역 약 6.28%, 그 외 지역 18.26%로 농업지역의 비율이 높으며 상류지점은 산림이 주로 분포하고 있고 중하류 지점과 하천변을 중심으로 농업지역이 분포하고 있다. 계성천 유역의 주된 생산활동으로는 농업활동과 축산업을 들 수 있다. 논과

밭의 경작지에서는 하절기에는 벼, 동절기에는 양파와 마늘을 재배하는 이모작 방식을 사용하고 있으며 약 300여개의 축사들과 함께 오염원으로 작용하고 있다. 특히 농업활동시 발생하는 탁수와 화학비료 및 액비의 살포와 축사에서 야적된 축분 및 축산폐기물이 강우시 하천으로 유출되어 수질악화의 주요한 원인으로 지적되고 있다(Lee et al., 2014). 유역내 주요 점오염원으로는 6개의 마을하수도(계교, 노단이, 동정, 유리, 월령, 및 신당), 남지하수종말처리장(Q=5,250 m³/d), 및 남지분노처리장(Q=50 m³/d)을 포함하며, 개인오수처리시설 또한 유역내 생활계 점오염원으로 작용하고 있다.

2.2 HSPF 모델 구축

2.2.1 구축 모델 개요

HSPF 모델은 대상 유역을 사용자가 정의한 하천 세그먼트를 기준으로 다수의 소유역으로 분할하고 각 소유역을 투수면(PERLND), 불투수면(IMPLND), 하천/호소(RCHRES) 등 세 개의 요소로 구분하여 수문 및 수질을 모의한다. 각 소유역별 구성요소(투수면, 불투수면, 하천/호소)에서 산정된 수량과 오염물질 부하는 입력파일의 SCHEMATIC과 MASS-LINK 블록에서 정의된 연결관계 따라 전달되며, 각 하천내에서는 유량의 하도추적과 오염물질의 거동기작모의를 수행한다. 특히 투수면에서의 오염부하 산정시 사용자 정의의 오염물질을 비교적 간편하게 계산 가능한 PQUAL모듈을 사용하거나, 살충제나 영양염류 등 특정 관심물질에 대한 상세 순환기작 모의를 필요로 하는 경우에는 AGCHEM섹션내 NITR, PHOS와 같은 상세 계산모듈을 사용할 수 있다. PQUAL모듈은 입력자료의 요구도가 상대적으로 낮아 기존의 HSPF 응용연구에서 많이 활용되고 있으나, 질소와 인 등의 상세 순환기작 모의가 불가능하며 중간 및 지하유출부하 산정시 농도값을 단순 입력하기 때문에 해당 오염물질에 대하여 제시된 다양한 저감시나리

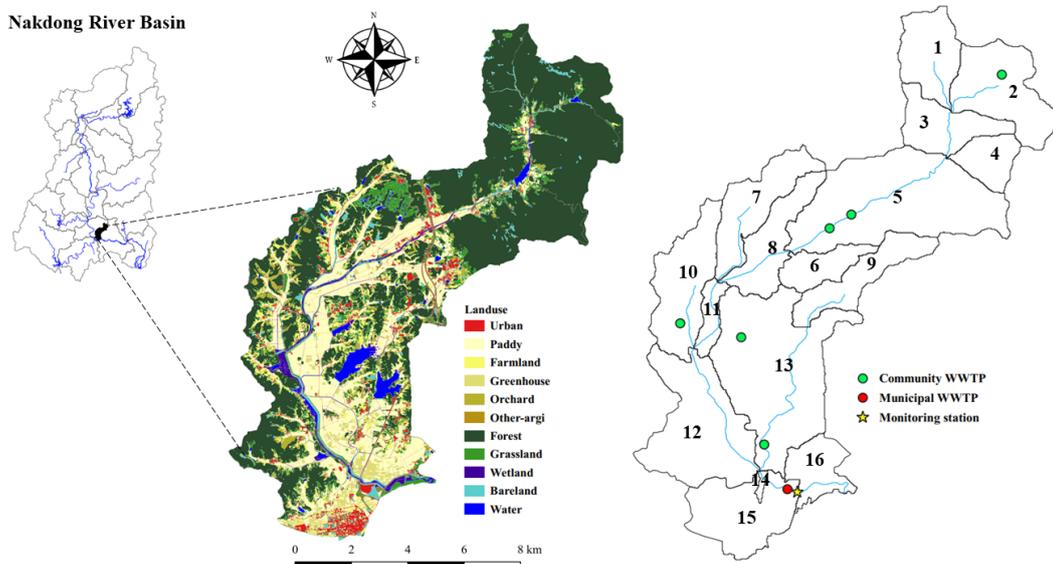


Fig. 1. Landuse map of the study area and the subwatershed delineation in the HSPF model

오 모의를 합리적으로 반영하기에 어려움이 있다. 반면 NITR과 PHOS와 같은 상세 순환모듈에서는 질소와 인의 침적, 흡탈착, 용해, 식생흡수, 변환 등 유역내 상세 거동특성 모의가 가능하므로 유역내 다양한 활동에 따른 해당 오염물질의 발생-순환-배출 경로별 오염저감대책을 반영한 시나리오 모의가 가능하다. 본 연구에서는 농업지역 오염원 저감 대책에 따른 수질개선효과 모의가 용이하도록, 투수면의 경우 BOD는 PQUAL, 질소와 인은 농업활동간 사용되는 화학비료, 액비, 축분의 투입, 식생에 의한 흡수 및 토양에서의 고정작용(Shin et al., 2016)에 의한 손실을 고려하여 더욱 상세히 모의가 가능한 NITR과 PHOS 모듈을 사용하였다(Fig. 2).

모델구축을 위한 입력자료는 기상자료(기상청), 공간자료(국토부), 오염원자료(환경부)로서 국가에서 제공하는 자료를 활용하였다. 모델구축기간은 2015~2020년이며 2015년(Warm-up), 2016~2018년(Calibration), 2019~2020년(Validation)을 준비 및 보·검정 기간으로 설정하였다. 모델구축을 위한 기상입력자료는 기온, 풍속, 전운량, 일사량, 이슬점온도 등이 있으며 인근 기상관측소인 도천방재기상관측소와 밀양종관기상관측소의 자료를 사용하였다. 유역의 하천 및 지형자료 구축은 유역도, 하천도, 수치지표고모델(DEM 30×30m)을 이용하여 16개의 소유역으로 분할하여 구축하였으며 14번 소유역(Fig. 1)은 실제 수질측정망으로 수위 및 수질 보·검정을 위한 지점으로 설정하였다. 토지이용은 논과 밭에 사용되는 화학비료 및 액비 살포를 반영하

기 위해 환경부 토지피복 대분류와 중분류를 참고하여, 도시지역, 논, 액비 살포지역의 논, 밭, 액비 살포지역의 밭, 초지, 시설재배지, 기타재배지, 습지, 산림, 수역 등 11개 토지이용으로 구분하였다.

2.2.2 오염원의 반영

유역내 점오염원은 6개의 마을하수도(계교, 노단이, 동정, 신당, 월령, 유리), 남지하수종말처리장 및 개인오수처리시설이 있으며 이를 모델에 반영하였다. 국립환경과학원에서 제공하는 2019년 전국오염원조사자료(NIER, 2020)를 토대로 마을하수도와 남지공공하수처리장의 배출부하를 반영하였고 생활계 오염부하 중 마을하수도, 하수처리시설을 제외한 양을 개인오수처리시설의 배출부하량으로 산정하여 적용하였다. 행정구역별 유역 기여율과 배출되는 하천지점을 고려하여 모델내 소유역별로 발생부하를 할당하였으며 Joo et al., (2010)이 제시한 낙동강 남해 중권역 평균 유달율(BOD, SS: 40%, TN: 30%, TP: 20%)을 초기 유달율로 설정하여 이후 모델 보검정 단계에서 모의값과 측정값을 비교하여 초기유달율의 50%내외에서 조정하였다.

계성천 유역은 농업활동이 주를 이루고 있으며 화학비료와 축사에서 발생하는 축분의 퇴비화 및 액비사용이 비점오염원으로써 작용하고 있다. 이를 반영하기 위해 논과 논 이외의 농업지역(밭, 시설재배지, 기타재배지)로 구분하여 총 비료살포량을 산정하여 적용하였다. 화학비료 살포량은 국내 연평균 화학비료 사용량인 260 kg/ha/yr(KFA, 2017)

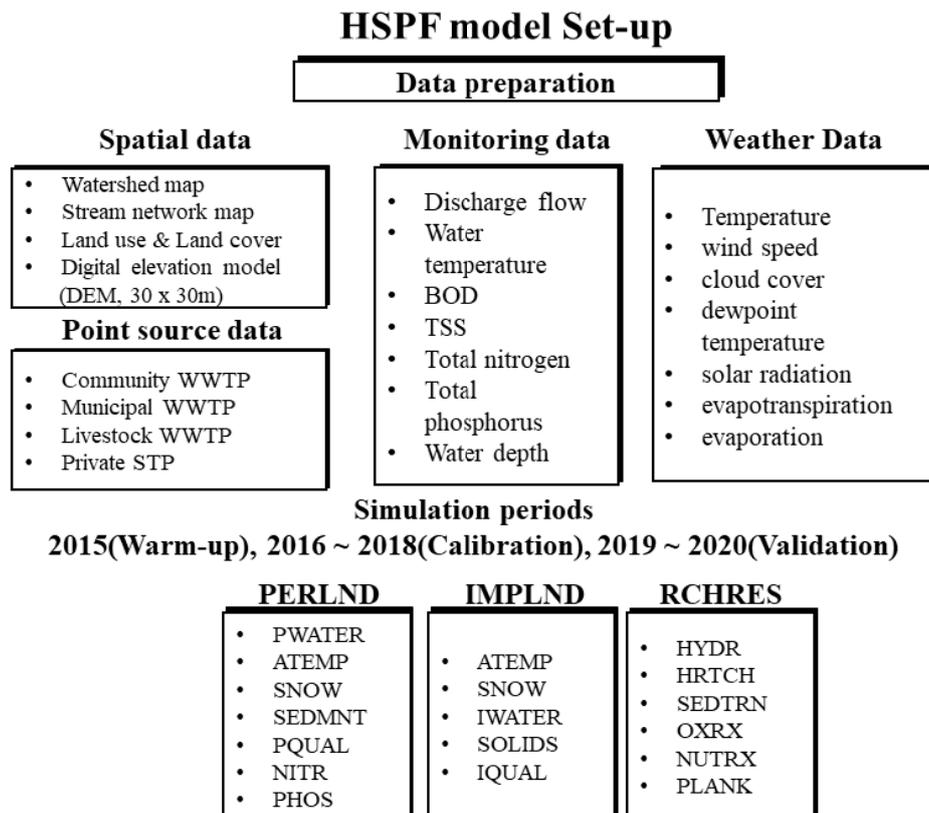


Fig. 2. Summary diagram of the HSPF model set-up

을 유역내 논과 밭에 적용하되 시기별 영농활동을 고려하여 월별 살포량으로 배분하였다. 논에서의 일반적인 비료살포는 5~6월에 밀거름과 가지거름을 70% 내외, 벼 출수 30일전인 7~8월에 30%내외로 권장하고 있다(RDA, 2001). 계성천 유역에서의 농업활동이 이모작 방식을 주로 사용하고 있음을 고려하여 월별 비료살포 비율을 5~6월에 각 20%, 7~8월에 10% 이외 달에 각 10% 살포하는 것을 가정하였다. 밭은 대부분 양파와 마늘 재배를 하고 있으며 주로 3월과 10월에 비료를 사용하고 있으므로 3월과 10월에 40%, 5~6월에 각 10%씩 살포하는 것으로 가정하였다. 유역내 장마면일대에서 액비를 농경지에 비료로써 사용하고 있으며 실제 액비 사용량을 확보하여 이를 월별 액비 사용량으로 분할하였다. 액비내 암모니아성 질소와 인산염 인의 농도는 Lee et al., (2006)에서 제시된 값을 토대로 각각 4.2 g/kg, 0.34 g/kg을 적용하였으며 유기성질소 및 무기성질소, 유기성인 및 무기성인의 농도비는 40% : 60%로 가정하였고 모델내에서 실제 액비가 반영된 12년과 13년 소유역(Fig. 1) 내 해당 면적(논: 656 ha, 밭: 207 ha)에 산출된 액비 사용량을 적용하였다. 축분은 2019년 전국오염원조사자료(NIER, 2020)에서 제공한 신고미만 축사별 축종, 사육두수, 사용정보와 오염총량관리기술지침에의 축종별 고형물 발생유량 및 축산분뇨 발생원단위를 사용하여 논과 논 이외의 농업지역으로 구분하여 전량 유기성으로 가정하여 모델내 논과 밭에 적용하였다. 이와 같이 산정된 화학비료, 액비, 축분 살포량을 건식침적의 형태로 모델내 MONTH-DATA블록을 사용하여 입력자료로 적용하였다. Fig. 3에 액비를 사용하고 있는 논과 밭, 액비를 사용하지 않는 논과 밭 각각에 대하여 모델에서 적용한 월별 비료살포에 따른 질소와 인의 형태별 입력 부하량을 나타내었다.

2.3 모델 보정 및 검증

모델의 보검정을 위해 모델내 14년 소유역(Fig. 1)에 위치한 국가수질측정망 지점인 '계성천'지점의 5~8일 간격의 유량, BOD, TN, TP 자료를 활용하였다. 모델의 보검정은 총 30개

의 매개변수를 대상으로 하였으며 USEPA에서 권고하는 우선순위에 따라 유량→BOD→TN→TP 순으로 각 항목별 정확도 지표를 토대로 단순 시행착오법을 통해 관련 매개변수를 순차적으로 조정하였다(Table 1). 항목별 정확도 지표는 유량은 R²와 NSE(Nash-Sutcliffe Efficiency)계수를 사용하였으며 BOD, TN, TP는 상대오차법(%difference)와 모의값과 실측값의 비인 O/S비를 사용하였다. 수질모델에서 유량은 수질항목에 비해 모의 정확도가 대체로 높아 R²와 NSE 계수를 정확도 평가시 많이 사용되고 있으며 수질항목에 대한 모의는 상대적으로 불확실성이 높아 Donigian., (2002)에서 제시하는 상대오차법(%difference)과 'HSPF Lecture note-15' (USEPA)에서 권고하는 O/S를 많이 사용하고 있으며 각 정확도 지표에 대한 식은 아래와 같다.

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

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})^2} \quad (2)$$

$$O/S = O_{avg} / S_{avg} \quad (3)$$

$$\%diff = \left(\frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right) \times 100 \quad (4)$$

여기서 O_i는 실측값, S_i는 모의값이며, O_{avg}는 실측값의 평균, S_{avg}는 예측값의 평균이고, n은 자료의 개수이다. 식 (1)과 식 (2)는 값이 1에 가까울수록 높은 정확도를 나타낸다. 식 (3)과 식 (4)는 Donigian., (2002)와 USEPA에서 제시한 모델 정확도 구간을 적용하였다. 식 (3)은 정확도가 Good

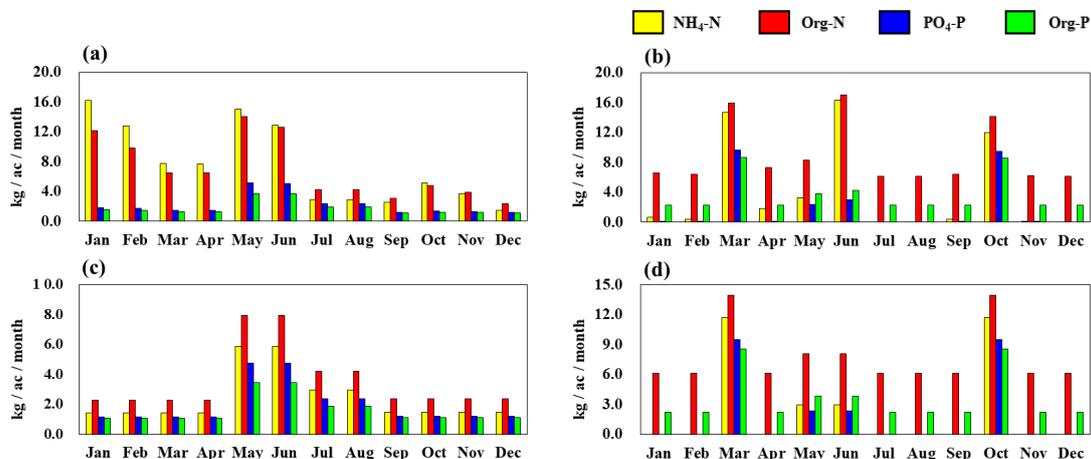


Fig. 3. Monthly nutrient loads by fertilizer application: (a) paddy fields with liquid fertilizer application, (b) farmlands with liquid fertilizer application, (c) paddy fields without liquid fertilizer application, and (d) farmlands without liquid fertilizer application

Table 1. Calibrated parameters of the HSPF model

Variable	Block/Module	Parameter	Description	unit	Range	Optimized Value
FLOW	PWAT-PARM2	LZSN	Lower zone nominal storage	in	0.01~100	91.113
		INFILT	Capacity of the soil	in/hr	0.0001~100	39.574
		KVARY	Behavior of groundwater recession flow	1/in	0.0~None	4.068
		AGWRC	Basic groundwater recession rate	1/day	0.001~0.999	0.986
	PWAT-PARM3	DEEPER	The fraction of groundwater inflow	-	0.0~1.0	0.300
		BASETP	Fraction of remaining potential E-T from baseflow	-	0.0~1.0	0.951
		AGWETP	Fraction of remaining potential E-T from active groundwater	-	0.0~1.0	0.618
	PWAT-PARM4	USZN	Upper zone nominal storage	in	0.01~10.0	0.267
		INTFW	Interflow inflow parameter	-	0.0~None	99.043
		IRC	Interflow recession parameter	1/day	1.0e-30~0.999	0.017
BOD	OX-GENPARM	KBOD20	BOD decay rate at 20 degrees °C	/hr	1.0e-30~None	0.015
		TCBOD	Temperature correction coefficient for BOD decay	-	1.0~2.0	1.047
		KODSET	BOD settling	ft/hr	0.0~None	0.010
		SUPSAT	Maximum allowable dissolved oxygen supersaturation	-	1.0~2.0	1.5
	OX-BENPARM	BENOD	Benthal oxygen demand at 20 degrees °C	mg/m ² ·hr	0.0~None	1.0
		TCBEN	Temperature correction coefficient for benthal oxygen demand	-	1.0~2.0	1.0
TN	NIT-UPTAKE	SKPLN	Plant nitrogen uptake reaction rate for surface layer	/day	0.0~None	0.5
		UKPLN	Plant nitrogen uptake reaction rate for upper layer	/day	0.0~None	1.0
		LKPLN	Plant nitrogen uptake reaction rate for lower layer	/day	0.0~None	0.5
	NIT-FSTPM	KDSAM	Ammonium desorption	/day	0.0~None	0.05
		KADAM	Ammonium adsorption	/day	0.0~None	0.03
		KAM	Organic N ammonification	/day	0.0~None	0.02
		KNI	Nitrification	/day	0.0~None	0.05
TP	PHOS-UPTAKE	SKPLP	Plant phosphorus uptake reaction rate for lower layer	/day	0.0~None	0.5
		UKPLP	Plant phosphorus uptake reaction rate for lower layer	/day	0.0~None	1.0
		LKPLP	Plant phosphorus uptake reaction rate for lower layer	/day	0.0~None	0.5
	PHOS-FSTPM	KDSP	Phosphate desorption	/day	0.0~None	0.07
		KADP	Phosphate adsorption	/day	0.0~None	0.04
		KIMP	Phosphate immobilization	/day	0.0~None	0.05
		KMP	Organic P mineralization	/day	0.0~None	0.04

Table 2. Accuracy Indicators for evaluating HSPF model

Accuracy indicator	Category	Average	Range	Accuracy indicator	Category	Very Good	Good	Fair
O/S	DO	0.99	0.90 ~ 1.06	%difference	Sediment	< 20	20 ~ 30	30 ~ 45
	TN	0.91	0.83 ~ 1.20		Water Quality	< 15	15 ~ 25	25 ~ 35
	TP	1.40	1.10 ~ 1.82		Nutrients	< 15	15 ~ 25	25 ~ 35

이상이 될 때 까지, 식 (4)는 값이 범위 내에서 만족할 때까지 보정을 실시하였다(Table 2).

2.4 오염원 저감시나리오 구성

본 연구에서는 유역내 다양한 농업비점오염원 저감시나

Table 3. Pollutant reduction scenarios

Category	Scenario	ID	Peroids	Removal rate	Applied area
Agriculture	Drainage outlet control	S1-1	Short-term	N: 31.5%, P: 41.8%	4.5% of total paddy area
		S1-2	Mid-term	N: 31.5%, P: 41.8%	37% of total paddy area
		S1-3	Long-term	N: 31.5%, P: 41.8%	total paddy area
	Replacement of controlled release fertilizers	S2-1	Short-term	N: 37%, P: 38%	10% of total paddy area
		S2-2	Mid-term	N: 37%, P: 38%	Total agriculture area
Livestock	Liquid fertilizer reduction	S3-1	Mid-term	N, P: 10%	Total liquid fertilizer applied area
		S3-2		N, P: 20%	
		S3-3		N, P: 30%	
	Manure management of small scale livestock facilities	S4-1	Long-term	N, P: 10%	Total agriculture area
		S4-2		N, P: 20%	
		S4-3		N, P: 30%	
Population	Private STP management	S5-1	Long-term	N, P: 10%	Total study area
		S5-2		N, P: 20%	
		S5-3		N, P: 30%	

리오에 따른 계성천 말단에서의 TN과 TP 농도 및 배출부하의 저감효과를 비교하고자 하였다. 시나리오 분석을 위한 강우사상의 규모 설정을 위해 도천방재기상관측소의 2001~2020년 총 20년간의 연간 강우량 자료를 토대로 백분율을 산정한 후 50%에 해당하는 2010년을 평수년으로 설정하였으며 해당 년의 일별 강우사상을 적용하여 모든 시나리오 모의를 수행하였다. 시나리오 구성은 농업비점관리, 축산비점관리, 생활계오염원(개인오수처리시설)제어 등 세 부분으로 구분하였으며 잠재적인 달성 가능 기간에 따라 단기, 중기, 장기로 구분하여 모의를 수행하였다. 단기 시나리오는 1년 이내 시행 가능하다고 판단된 저감시나리오로서 현행 오염원 저감 시범사업 규모의 면적을 반영하여 구성하였으며(MOE, 2022) 중기시나리오는 5년 이내 시행 가능하다고 판단된 시나리오로 구성하였다. 마지막으로 장기시나리오는 계성천 전유역에 적용하는 시나리오로 대책 적용을 위해 5년 이상의 비교적 긴 시간이 필요하다고 판단된 저감시나리오로 구성하였다(Table 3).

농업비점관리부문은 배수물꼬관리(drainage outlet control), 완효성비료(replacement of controlled release fertilizers)의 사용으로 구성하였다. 배수물꼬관리는 본 연구지역에 수립된 향후 오염원 저감사업 계획을 토대로 단기, 중기, 장기로 분류하였으며 단기는 계성천 논 중 4.5%에 해당하는 65 ha에 적용하는 시나리오, 중기는 계성천 논 중 37%에 해당하는 529 ha에 적용되는 시나리오, 장기는 유역내 전체 논에 적용하는 시나리오로 구성하였다(MOE, 2022). 배수물꼬관리 저감효율은 국내 문헌 조사를 통해 제시된 저감 효율값의 평균값(Kim et al., 2016; NIER, 2019)인 N: 31.5%, P: 41.8%를 적용하였다. 완효성비료의 사용 부문은 기존 화학비료에 비해 질소와 인의 함량이 적고 시비횟수 절감 및 유실량을 감축할 수 있는 장점이 있으며(Lee et al., 2000) 배수물꼬관리와 같이 시설의 설치 없이 기존 사

용되는 비료의 교체만으로 질소와 인의 배출저감이 가능하기에 단기와 중기시나리오만으로 구성하였다. 완효성비료의 사용을 통한 저감효율은 현재 계성천에 실제 사용되고 있는 기존 비료와 완효성비료의 성분비 차이값으로 산정하였으며 N: 37%, P: 38%를 적용하였다.

축산비점관리부문은 액비저감(liquid fertilizer reduction)과 소규모축산농가 축분관리(manure management of small scale livestock facilities)로 구성하였다. 액비는 가축분뇨를 액비화시켜 농업활동시 사용되는데 액비저감대책 반영을 위하여 유역내 실제 액비살포지역을 대상으로 각각 10%, 20%, 30%의 저감효율을 적용하여 중기시나리오로 구성하였다. 소규모축산농가 축분관리 부문은 소규모 축산농가에서 발생하는 가축분뇨는 논과 밭에 비료로 사용하기 위해 장기간 축사 주변에 야적되어 있으며 강우시 고농도의 질소와 인을 배출시키기에 장기적인 제어가 필요할 것으로 판단되어 장기 시나리오로 구성하였으며 유역내 전체 농업지역에 각각 10%, 20%, 30%의 저감효율을 적용하였다.

생활계 개인오수처리시설관리 부문(private sewage treatment plant management)은 유역내 소규모로 운영되는 개인오수처리시설들의 미운영 및 미인증 제품 사용 등으로 운영관리가 미흡하며(Lee et al., 2020) 기술지원, 시설 및 제도적 개선(Jang et al., 2010)을 통한 장기적인 제어가 필요할 것으로 판단되며 초기 발생부하값에 항목별 10%, 20%, 30% 저감효율을 적용하여 장기시나리오로 구성하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 모델 보검정 결과

Fig. 4는 항목별 보검정 결과를 나타낸 것이다. 유량은 보검정기간동안 $R^2 = 0.92$, NSE = 0.88, 검정기간동안 $R^2 =$

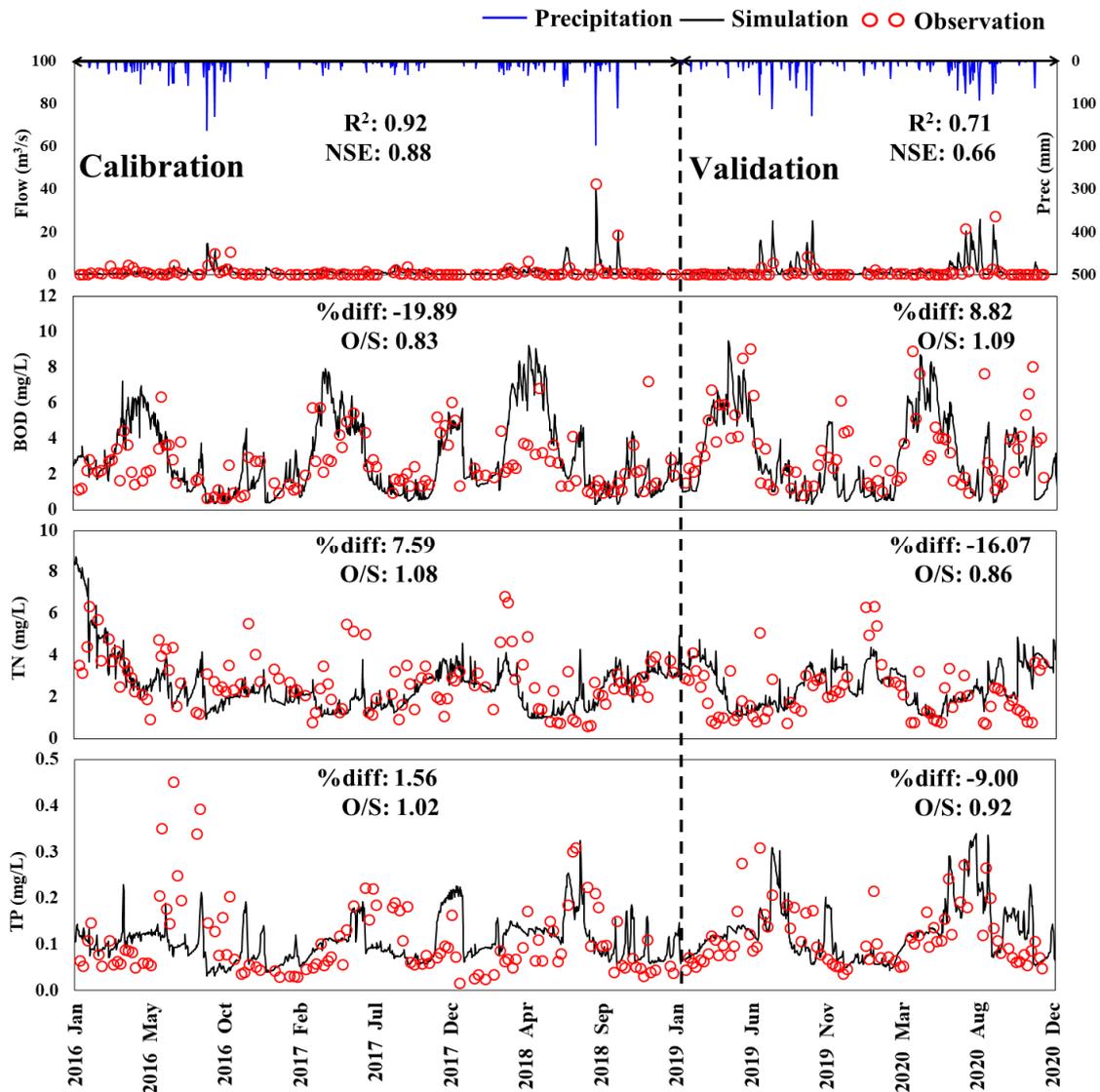


Fig. 4. Results of model calibration and validation

0.71, NSE = 0.66으로 모델이 유량을 적절히 모의하는 것으로 나타났다. BOD는 보정기간에 %difference = -19.89, O/S = 0.83, 검정기간에 %difference = -8.82, O/S = 1.09로 나타났으며 TN은 보정기간에 %difference = 7.59, O/S = 1.08, 검정기간에 %difference = -16.07, O/S = 0.86로 나타났다. TP는 보정기간에 %difference = -1.56, O/S = 1.02, 검정기간에 %difference = -9.00, O/S = 0.92로 나타났다. BOD는 여름철에 비해 겨울철과 봄철에 높은 농도를 보였으며 정확도 판정 결과 ‘Good’ 이상으로 계절별 경향성을 잘 모의하는 것으로 나타났다. TN은 유역 말단에 위치한 하수처리장의 영향이 클 것으로 예상되며 여름철에 비해 겨울철에 높은 농도를 나타내는 경향이 있는데 이는 겨울철 하수처리장내 미생물 활동성의 저하로 인한 질소제거효율 감소(Shin et al., 1997)와 기저유량감소에 따른 농도상승효과(Kim et al., 2009) 때문으로 판단되며 정확도 판정결과 모두 ‘Good’ 이상으로 계절별 경향성

을 잘 모의하는 것으로 나타났다. TP는 2016년 여름철에 측정값이 다른 해에 비해 높게 나타남에 따라 모의 결과과소평가되지만 그 외 기간 동안은 계절별 경향성을 잘 모의하고 있으며 정확도 판정 결과 ‘Good’ 이상으로 TP 변화추이를 잘 모의하는 것으로 나타났다. 전반적인 수질항목별 경향성을 보았을 때 여름철에 비해 겨울철에 높은 농도를 나타내는 것을 알 수 있는데 이는 계성천유역 농업활동이 주로 이모작 방식을 사용하고 있어 겨울철 생산하는 양파와 마늘 농사의 영향으로 배출되는 영양물질의 영향으로 판단되며 모델이 유역에서 발생하는 유량 및 수질을 적절히 모의하는 것을 알 수 있다.

3.2 시나리오별 수질 및 부하량 개선효과

3.2.1 개별 시나리오 모의 결과

Fig. 5는 각각의 시나리오 적용에 따른 TN과 TP의 연간

부하 저감효과 및 연평균농도 저감효과를 나타낸 것이다. 단기 시나리오 모의 결과 부하 및 농도 저감효율은 1%미만으로 낮게 나타났다. 단기 시나리오의 경우 계성천 유역에 시범사업의 일환으로 유역내 농업지역 면적 중 일부에

만 적용됨에 따라 모의결과에서는 유역 말단에서의 수질개선효과는 가시적이지 않은 것으로 나타났다. 단기 시나리오 중 완효성비료의 사용은 유역내 장마면 일대 150 ha에만 적용되어 계성천 말단에서의 수질 개선효과는 미미하였으

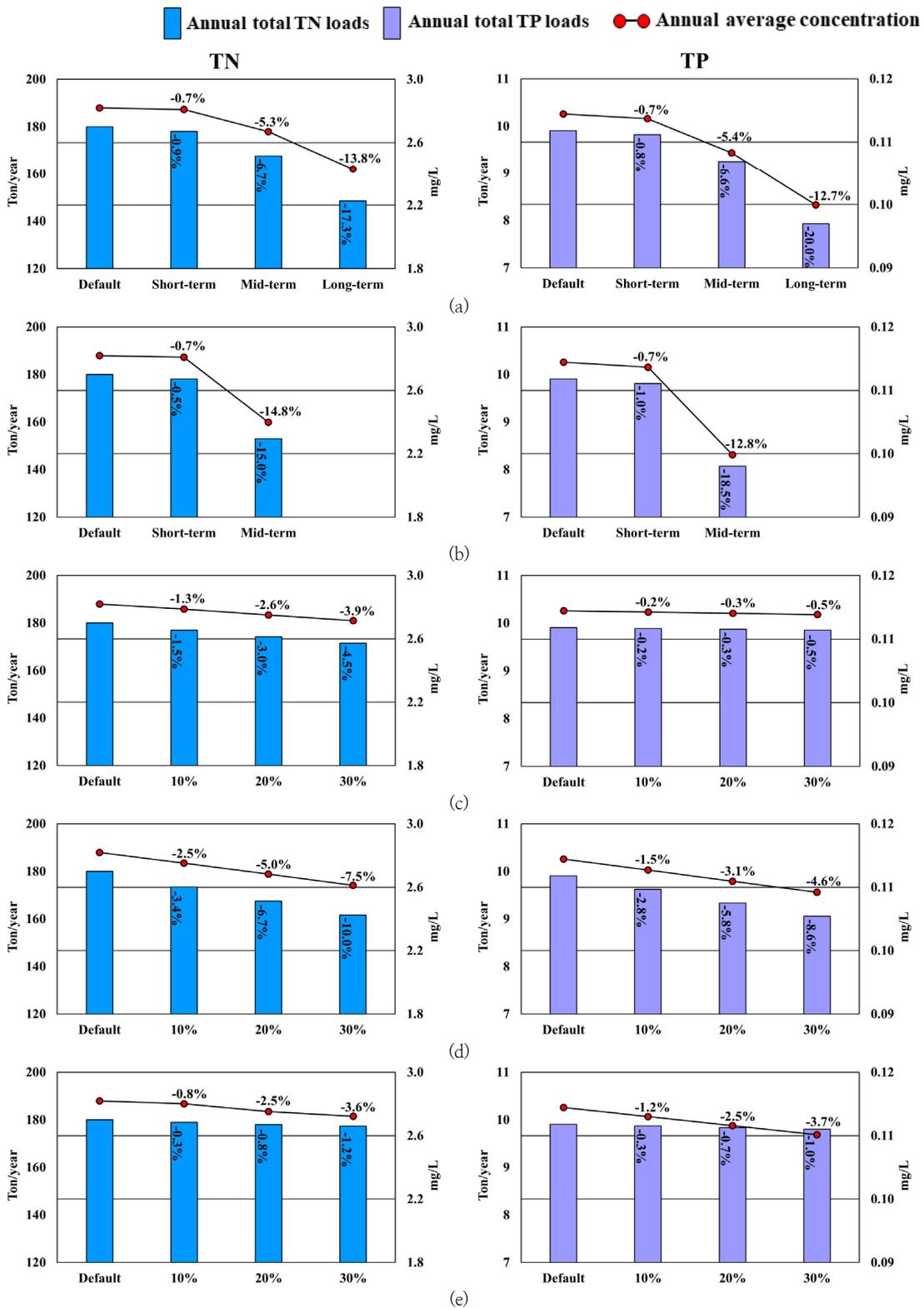


Fig. 5. Comparison of loads and concentration after applying the scenarios: (a) drainage outlet control, (b) replacement of controlled release fertilizers, (c) liquid fertilizer reduction, (d) manure management of small scale livestock facilities, and (e) Private STP management,

나 대책이 적용된 집수구역내 계성천 본류로 합류되는 해당지천지점의 수질 개선효과는 상대적으로 높을 것으로 예상된다.

중기 시나리오 모의 결과 부하 및 농도 저감효과는 대체로 유사한 경향을 보였다. 완효성비료의 사용의 부하 및 농도 저감효율은 TN의 경우 각각 15.0% 및 14.8%, TP의 경우 각각 18.5% 및 12.8%로 가장 수질개선효과가 가장 좋았으며 액비저감 시나리오가 가장 낮은 수질개선효과를 보였다. 타 시나리오에 비해 완효성비료의 사용이 유역내 농업지역 전반에 걸쳐 저감대책이 적용되어 수질개선효과가 가장 높은 것으로 판단된다. 가장 낮은 수질개선효과를 보인 액비저감의 경우 모델내 오염원 반영시 유역 전역에 적용되는 비료 및 축분과 달리 유역내 실제 액비살포지역만을 대상으로 적용함으로써 비교적 오염기여도가 작기 때문에 상대적으로 수질개선효과가 크지 않은 것으로 판단된다. 장기 시나리오 모의 결과 배수물꼬관리의 부하 및 농도 저감효율은 TN의 경우 각각 17.3% 및 13.8%, TP의 경우 각각 20.0%, 12.7%로 가장 높은 수질개선효과를 보였으며 개인오수처리시설관리부문에서 상대적으로 낮은 수질개선효과를 보였다. 배수물꼬관리의 경우 계성천 유역내 전체 논에 배수물꼬관리 시설을 적용함으로써 농업활동시 발생하는 고농도의 탁수를 직접 제어하기에 타 시나리오에 비해 높은 수질개선효과를 보인 것으로 판단된다. 개인오수처리시설관리의 경우 2019년 전국오염원조사자료(NIER, 2020)를 활용하여 행정구역별 초기 발생부하값을 할당된 후 모델 보검정시에 유달율을 적용함에 따라 배출부하량이 타 오염원에 비해 상대적으로 낮게 산정되어 저감 효율 적용시 나타나는 수질개선효과가 상대적으로 낮았다. 그러나 실제 계성천 유역관리시 개인오수처리시설 운영간 미인증 제품 및 운영관리 불량 등으로 장기적으로 하천에 높은 오염기여도가 있을 것으로 추정되므로 추후 개인오수처리시설에 대한 조사 연구와 관리방안 수립도 고려가 필요할 것이다. 소규모축사에서 발생하는 축분의 경우 배출경로에 따른 실측 조사자료가 부재하여 모델에 정확한 반영에 어려움이 있다. 그러나 축분은 평상시 축사 주변에 야적되어 농업활동시 논과 밭에 비료로써 사용되는데 강우시 야적된 축분의 고농도의 질소, 인, 고형물 등을 하천으로 유입시키기

때문에 장기적으로 축분에 대한 관리가 필요할 것으로 사료된다.

3.2.2 복합 시나리오 모의 결과

복합시나리오는 개별 시나리오를 토대로 평수년 기준 달성기간이 같은 시나리오를 조합하여 구성하였다. 즉 현장규모 저감방안의 배수물꼬관리 단기대책과 완효성비료 사용의 단기대책을 함께 적용한 단기복합 시나리오와 유역내 중규모 면적에 반영되는 배수물꼬관리 중기대책 및 액비저감대책과 유역 전반에 적용되지만 달성기간이 적게 소요되는 완효성비료의 사용을 함께 적용한 중기복합 시나리오, 마지막으로 모든 단일 시나리오들이 계성천 전역에 적용될 경우를 장기복합 시나리오로 구분하여 그에 따른 수질개선효과를 모의하여 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 단기복합 시나리오의 부하 및 농도 저감효율은 약 1%로 각 단일 시나리오들의 그것보다 약간 높았으나 그 차이는 미미하였다. 중기복합 시나리오의 부하 및 농도 저감효율은 TN의 경우 각각 22.7% 및 18.7%, TP의 경우 각각 23.4% 및 16.8%였으며 장기복합시나리오의 부하 및 농도 저감효율은 TN의 경우 각각 40.6% 및 35.1%, TP의 경우 각각 41.1% 및 29.2%로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 계성천유역에 대해 유역 및 하천에서의 오염물질 거동 모의와 각종 시나리오 반영이 용이한 HSPF모델을 활용하여 농업지역에서 발생하는 오염원에 대한 대안적 관리방안에 따른 수질개선효과를 분석하였다. 모델 구축기간은 2015~2020년으로 공간자료와 기상자료를 활용하여 모델을 구축하였으며 연구지역이 농업중심지역임을 고려하여 농업지역의 토지이용분류를 세분화하였다. 특히 본 연구에서는 비료, 침적, 토양기작(용해, 흡착, 결정화)과 식물의 성장률에 따른 영양물질의 섭취 및 고정작용을 고려하여 상세히 모의가 가능한 NITR과 PHOS를 사용하였으며, 유역내 사용되는 화학비료와, 액비, 축산농가에서 발생하는 축분의 발생 및 사용량을 건식침적의 형태로 모델에 입력하였다. 모델 구축 기간 동안 유량, BOD, TN, TP항목

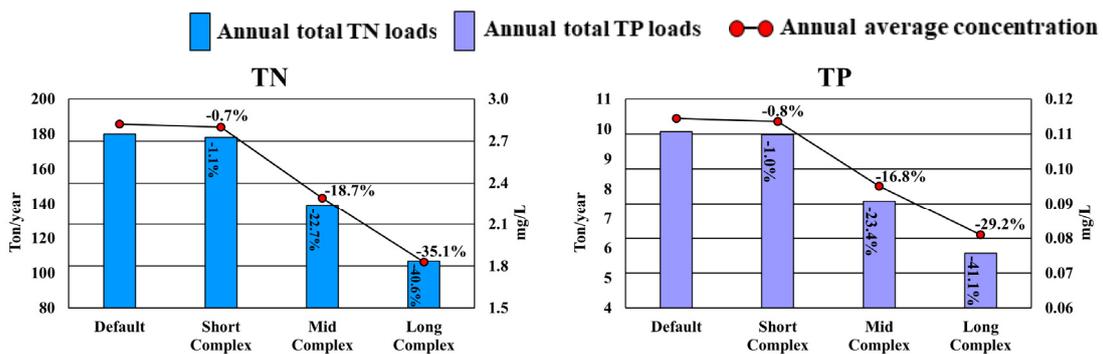


Fig. 6. Comparison of loads and concentration short/mid/long term complex scenarios

에 대하여 보·검정을 수행하였으며 적합도 판정 결과 모든 항목에서 높은 적합도를 보였으며 수질항목은 계절별 경향성을 잘 모의하는 것으로 나타났다.

농업비점관리, 축산비점관리, 생활계 오염원제어 부문으로 대책의 달성기간에 따라 단기, 중기, 및 장기로 구분하여 단기 시나리오를 구성하였으며 이를 토대로 적용시기별 조합에 따라 3개의 복합시나리오를 구성하여 최적관리 방안에 따른 수질개선효과를 평수년 기준 계성천 말단에서 비교하였다. 단기 시나리오의 경우 유역내 전체면적대비 적용면적이 상대적으로 작기 때문에 계성천 말단에서의 수질개선효과는 미미하였다. 중기시나리오의 경우 계성천 유역에 완효성 비료를 사용할 경우 TN, TP의 연간부하량은 각각 15.0%, 18.5%, 연평균 농도는 각각 14.8, 12.8% 감소되어 가장 높은 수질개선효과를 나타냈다. 가장 낮은 수질개선효과를 보인 액비저감의 경우 실제 액비가 사용되는 제한된 면적에만 적용됨으로써 비료와 축분에 비해 오염기여도가 적어 비교적 낮은 효과를 나타낸 것으로 판단된다. 장기 단일 시나리오 중 배수물포관리 대책의 경우 TN, TP의 연간부하량은 각각 17.3%, 20.0% 연평균 농도는 각각 13.8%, 12.7%로 감소되며 가장 높은 수질개선효과를 보였다. 축분관리와 생활계 오염원제어는 상대적으로 낮은 수질개선효과를 보였는데 축분의 경우 전국오염원조사자료를 토대로 산출된 양을 적용하였기 때문에 정확한 모의가 어려웠다. 추후 실제 계성천 유역의 정확한 축분발생량을 파악하여 유역내 축사에서 오염기여도를 파악할 필요성이 있을 것으로 사료된다. 개인오수처리시설의 경우 유역내 400여개의 시설이 분포되어있으며 점오염원으로 작용하고 있으나 유달음을 적용함에 따라 오염원 저감에 따른 수질개선 효과가 다소 과소평가되었지만 추후 유역관리시 이에 대한 관리도 중요할 것으로 사료된다. 달성기간별 복합시나리오에 따른 수질개선효과를 분석한 결과 단기복합 시나리오에 구성된 개별 단일 시나리오들의 효과가 미미하여 계성천 말단에서의 수질개선효과는 크지 않았다. 그러나 대책이 적용된 집수구역에서의 수질개선효과는 기대됨으로 향후 보다 정밀한 분석이 필요할 것으로 사료된다. 중기복합 시나리오의 경우 TN, TP의 연간부하량은 각각 22.7%, 23.4%, 연평균농도는 각각 18.7%, 16.8% 감소되었다. 최종적으로 유역내 전반에 반영되는 장기복합시나리오의 경우 TN, TP의 연간부하량은 각각 40.6%, 41.1%, 연평균농도는 각각 35.1%, 29.2% 감소되는 효과를 보였다.

본 모의를 통해 배수물포 관리, 완효성비료의 사용, 축산농가 관리가 계성천 수질 개선에 상당한 효과가 있을 것으로 분석되며 유역내 전반에 적용하였을 때 더 높은 저감효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 향후 농업지역에서 발생 및 사용되는 여러 형태의 비료와 축분의 발생 및 배출경로에 따른 조사결과를 토대로 모델 구축시 더욱 신뢰도 높은 수질 예측이 가능할 것으로 판단되며 향후 비점오염원 관리대책 수립시 의사결정도구로써 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 한국환경공단 (계성천 유역 농촌 비점오염저감 1단계 대책 추진 연구)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Ahn, T, Kim, D., Lee, H., Shin, H., Chung, E (2021). A Study of Nutrient Composition and Heavy Metal Contents in Livestock Manure Compost-Liquefied Fertilizer, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 37(4), 306–314. [DOI: <https://doi.org/10.15681/KSWE.2021.37.4.306>]
- 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, YJ., Hwang, HS., Lee, SJ., Kim, YS., Yoon, KS (2017). Application of TMDL by Methods for Agricultural Non-point Source Pollution Reduction, *Proceeding of the Korean Society of Agricultural Engineers Conference*, Korean Society of agricultural Engineers, pp. 57–57.
- Donigian, AS (2002). Watershed model calibration and validation: The HSPF experience, In: *TMDL Conference 2002*, *Water Environment Federation*, pp. 44–73.
- Jang, HJ., Lee JH., Kang SH (2010). The System Improvement of the Individual Sewage Treatment System, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 24(1), 33–40.
- Joo, SH., Kang, JY., Kang, DK (2010). Determination of Delivery Ratio with Empirical Equation in Namhae, Nakdong River Middle Watersheds, *Proceedings of the 2010 Conference of the Korean Society of Environmental Engineers*, Korean Society of Environmental Engineers, pp. 127–128.
- Jung SH., Rhee, HP., Hwang, HS., Yoon, CG (2020). A Study on the Applicability of HSPF Paddy-RCH for Calculating the Reduction of Agricultural Non-point Pollutants, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 42(12), 593–602. [DOI: <https://doi.org/10.4491/KSEE.2020.42.12.593>]
- Kim, GH., Lee, HS (2009). Impacts of Nitrate in Base Flow Discharge on Surface Water Quality, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 29(1B), 105–109.
- Kim, K., Kang, MS., Song, IH., Song, JH., Park, J., Jun, SM, Jang, JR, Kim, JS (2016). Effects of Controlled Drainage and Slow-release Fertilizer on Nutrient Pollutant Loads from Paddy Fields, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 58(1), 1–10. [DOI: <http://dx.doi.org/10.5389/KSAE.2016.58.1.001>]
- Kim, YH., Kang, JH (2004). Determination of Event Mean

- Concentrations and Pollutant Loadings in Highway Storm Runoff, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 20(6), 631–640.
- Lecture #15, Calibration and Validation Issues and Procedures Workshop Handbook and CD, Office of Science and Technology, USEPA.
- Lee, CH., Lim, SK (1995). Studies on the Behavior of N, P, K Fertilizers Applied in Paddy Soils and the Water Pollution Caused by the Leachate, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 11(4), 279–285.
- Lee, DG., Song, JH., Ryu, JH., Lee, JN., Choi, SK., Kang, MS (2018). Integrating the Mechanisms of Agricultural Reservoir and Paddy Cultivation to the HSPF–MASA–CREAMS–PADDY System, *Journal of the Korean Society Agricultural Engineers*, 60(6), 1–12. [DOI: <https://doi.org/10.5389/KSAE.2018.60.6.001>]
- Lee, ET., Cho, SK., Oh, YB., Choi, IH (2000). Effect of Releasing Fertilizer in Cultivating Onion, *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 18(1), 681–681.
- Lee, JT., Ha, IJ., Kim, HE., Moon, JS., Kim, WI., Song, WD (2006). Effect of Liquid Pig Manure on Growth, Nutrient Uptake of Onion, and Chemical Properties in Soil, *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 24(2), 148–156.
- Lee, JH., SHIN, HG., (2020). Study on the Operation and Status of Private Sewage Treatment Facilities, *Journal of Korea Organic Resources Recycling Association*, 28(2), 31–40. [DOI: <https://doi.org/10.17137/korrae.2020.28.2.31>]
- Lee, YH., Kim, YS., Park, J., Oa, SW (2014). Estimation of Production Unit Loads of Livestock Manure Based on TOC, *Journal of Wetlands Research*, 16(3), 403–409. [DOI: <https://doi.org/10.17663/JWR.2014.16.3.403>]
- Ministry of Environment (MOE). (2020). The Republic of Korea's 3rd National Comprehensive Nonpoint Source Pollution Management Plan 2021–2025, Ministry of Environment. [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]
- National Assembly Library (NAL). (2017). Fertilizer Yearbook 2017, Korea Fertilizer Association. <https://www.nanet.go.kr/main.do>.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2014). Rural areas non–point pollution source management planning guidelines provided research, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2019). The empirical study on agricultural non–point source pollution reduction for TMDL (Total Maximum Daily Load), 11–1480523–003790–01, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2020). The 2019 nationwide survey report on the pollutant sources. <https://wems.nier.go.kr/>.
- Park, SH., Kim, SG., Moon, SY (2019). A Study on Management Method of Pumping & Drain Station Water Gate for Reduction of Agricultural Non–Point Pollution, *Journal of Korea Society of Water Science and Technology*, 27(1), 21–29. [DOI: <http://dx.doi.org/10.17640/KSWST.2019.27.1.21>]
- Park, YS., Ryu, J., Kim, J., Kum, D., Lim, KJ (2020). Review of Features and Applications of Watershed–scale Modeling, and Improvement Strategies of it in South–Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 36(6), 592–610. [DOI: <https://doi.org/10.15681/KSWE.2020.36.6.592>]
- Richard, T., Guido, Y., Gary, S., Lewis, L., Ping, W., Gopal, B., Amanda, P (2013). Sensitivity analysis of the HSPF AGCHEM Model, Chesapeake Bay Program. Rural Development Administration (RDA). (2001). The correct method of using fertilizer, ISBN 978–89–480–2001–4 95520, Rural Development Administration. [Korean Literature]
- Shin, CM., Kim, KH (2016). Operational Water Quality Forecast for the Nakdong River Basin Using HSPF Watershed Model, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 32(6), 570–581. [DOI: <https://doi.org/10.15681/KSWE.2016.32.6.570>]
- Shin, EB., Bae, WK., Kang, HM., Yoon, HS., Hong, SK., Kim, SK., Yu, DY (1997). Biological Nutrients Removal Efficiencies Under Different Temperatures, *Bulletin of Environmental Sciences*, 18, 17–30.
- Son, JG., Lee, GA., Yoo, DS., Cho, JY (2014). Reduction of Agricultural Non–point Pollution Source by Scenarios of Best Management Practices on Cropping System Alternatives of Main Upland Crop in Saemangeum Watershed, *Journal of Applied Biological Chemistry*, 57(1), 95–101. [DOI: <https://doi.org/10.3839/jabc.2014.015>]