



HSPF 모형을 이용한 비점오염 저감용 정화림 조성의 적절성 평가

Evaluation of Riparian Buffer for the Reduction Efficiency of Non-point Sources Using HSPF Model

이시현* · 김재문** · 신현석*** · 권순철****

Lee, Sihyeon*, Kim, Jae Moon**, Shin, Hyun Suk***, and Kwon, Soonchul****

Abstract

In recent years, the increase of non-point sources flowing into rivers has made their water quality management challenging. In this study, we estimated the reduction efficiency of non-point sources using riparian buffer sites in the Kumho River watershed, utilizing the HSPF (Hydrological Simulation Program-FORTRAN) as the water runoff model. We calculated and validated the accuracy of the modeling performance through the coefficient of determination R^2 and the % difference of the modeling evaluation that represents the levels of water quality as Very good (FLOW, BOD) or Good (TP). We found that the simulated values were well consistent with the measured ones. For sub-watersheds of the Kumho River watershed, we set five scenarios depending on the site area (10,000, 20,000, 40,000, 160,000, and 320,000 m^2). The BOD and the TP were estimated to be equal to 17.68% and 13.71%, respectively, for 20-30 mm rainfall in the 320,000 m^2 riparian buffer. This is a very low value, but is the result of considering a very small portion (0.084%) of the RCH4 watershed area. These results suggest that the Best Management Practice (BMP) is effective for the reduction and management of non-point pollution sources.

Key words : Riparian Buffer, HSPF, Non-point Sources, Improvement of Water Quality, BMP

요 지

최근 하천으로 유입되는 비점오염원의 증가로 하천의 수질관리에 어려움이 있어 이를 개선하기 위한 여러 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 유역유출모델인 HSPF (Hydrological Simulation Program-FORTRAN)를 활용하여 금호강 유역에 정화림을 적용하여 정화림 면적에 따른 비점오염원의 저감효율을 BOD, TP 농도로 산정하였다. HSPF 모형의 검·보정 평가를 위해 결정계수인 R^2 , %difference를 산출하였다. 검·보정 결과 Very good (FLOW, BOD), Good (TP)으로 산정되어 모의치가 실측치를 잘 반영한다고 판단하였다. HSPF 모형 대상지인 금호강 유역내 소유역을 대상으로 면적에 따른 (10,000, 20,000, 40,000, 160,000, 320,000 m^2) 시나리오를 설정하였다. 320,000 m^2 면적의 정화림에서 20~30 mm 강우에 대해 저감효율이 BOD는 17.68%, TP는 13.71%로 산정되었다. 이는 매우 낮은 수치이나 이때 적용한 정화림 면적이 RCH4 유역 면적의 0.084%로 매우 낮은 면적을 적용한 결과라 할 수 있다. 이러한 결과는 비점오염원 저감 및 관리를 위한 방안으로 최적관리모델(BMP) 적용이 효율적임을 보여주는 연구사례라 사료된다.

핵심용어 : 정화림, HSPF, 비점오염원, 수질개선, BMP

*정회원, 부산대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: tlgus24773@naver.com)
Member, Master's Degree, Department of Civil Engineering, Pusan National University

**부산대학교 토목공학과 박사과정

Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Pusan National University

***부산대학교 토목공학과 교수

Professor, Department of Civil Engineering, Pusan National University

****교신저자, 정회원, 부산대학교 토목공학과 조교수(Tel: +82-51-510-7640, Fax: +82-51-513-9596, E-mail: sckwon@pusan.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Pusan National University

1. 서론

최근 우리나라는 급격한 도시화로 인한 불투수면적의 확대 및 기후변화로 인한 국지성 호우의 증가, 가뭄현상의 지속화 등으로 인해 하천 저수량 감소, 수질 악화 등과 같은 현상이 지속되고 있다. 이러한 현상은 효과적인 수자원 관리 및 하천의 수질관리를 어렵게 하고 있다. 특히 무강우시 축적된 비점오염원들이 강우시 다량으로 하천에 유입되어 하천 수질을 저하시키기 원인이 되므로 비점오염원 관리가 필요하다. 유역으로 유입되는 오염물질은 배출 형태에 따라 점오염원(Point source)과 비점오염원(Non-point sources)로 구분되는데, 발생원과 경로가 명확하여 지속적인 관리가 가능한 점오염원과 달리 비점오염물질의 유출이 불확정 사상인 강수와 함께 발생되므로 오염물질 배출의 시기와 양이 매우 불확실한 특성을 지니고 있다(Kwun, 1998). 특히 강우발생으로 인한 비점오염원 지표유출 형상은 토지이용 상태에 많은 영향을 받으며, 다양한 오염물질을 포함하고 있어, 보다 효과적인 유역의 수질 관리를 위해서 비점오염원 배출 제어에 대한 관리와 대책이 반드시 필요하다(Yoon et al., 2007).

국내·외에서는 수자원관리 및 수문현상 회복, 비점오염원의 배출 저감 및 관리를 위한 대책으로 LID 기술(Low Impact Development)에 대한 연구가 진행되고 있다(Hyun, 2010). LID 기술은 개발 전의 수문기능을 유지하거나 회복시키는 것을 목표로 하는 빗물관리 기법으로 지하수 충전율을 높여 물순환 개선과 동시에 여과 및 침투 기작을 활용하여 오염저감을 달성하는 기법이다. LID 요소기술로는 옥상녹화, 투수성 포장, 나무여과 상자, 식생저류지, 식생완충대 등이 있는데, 이 중 식생형 LID 요소기술중 하나인 정화림은 수질정화 및 기타 용도로 수변지역에 설치하는 수변림의 일종으로, 국외에서는 수변보호지대(Riparian Protection Zones), 완충지(Buffers), 여과띠(Filter Strips), 수변관리지대(Riparian Management Zones) 등으로 다양하게 부르고 있다(KEI, 2000).

수변지대는 하천의 전체 크기를 유지하며 환경변화 적응에도 매우 큰 영향을 미쳐 홍수나 가뭄 등의 수리·수문학적인 하천관리에도 중요한 요소로 보고 되고 있다(McBride et al., 2008). 수변지대의 일종인 정화림은 유역으로부터 유입되는 영양염류 및 토사 등을 여과기작을 통해 제거 및 저류하여 수질을 향상시킬 수 있으며 동식물의 서식처 등을 제공, 홍수조절, 수량 보존 등 다양한 기능을 하는 시설이다. 또한 정화림은 국외에서 식생의 자연정화능력을 이용한 처리가 효과적이며, 비점오염원의 배출 특성 제어에 부합되는 LID 기반 비점오염원 저감 요소기술로써 알려져 있으며(Kwun, 1998), 미국 매릴랜드 주(Rhode river), 아이오와주(Bear ceek) 등은 수질 정화를 목적으로 수변완충녹지를 조성, 비점오염원 삭감 효과에 대해 분석중이다(KEITI, 2014).

비점오염원 저감 시설에 대한 연구는 장기적인 모니터링

을 바탕으로 진행되어야 하지만 비용과 시간, 인력 등이 많이 소요되어 실질적으로 수행하기 어려운 문제점이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 국내·외에서는 다양한 유역 유출모델을 활용하여 비점오염원 저감 연구를 수행 중에 있다. 수질모의가 가능한 대표적인 유역유출모델은 도시유역에 많이 적용하는 STORM, SWMM, DR3M-QUAL 등이 있으며 농촌유역에 많이 적용되는 ANSWERS, AGNPS와 SWAT 등이 있으며 도시 및 농촌 혼합 유역에 사용할 수 있는 HSPF 모형 등이 있다(Knisel, 1980; Beasley and Huggins, 1981; U.S. EPA, 2001). 그중 Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF)은 다른 모형과 달리 강우로 인한 비점오염물질의 유출과정을 하천 내에서의 수리학적 현상, 퇴적물, 화학물질의 상호작용과 결합시켜 모의할 수 있는 유역모델과 수질모델이 결합된 형태를 취하고 있어 오염물질 거동분석을 위한 유역유출모델로써 많이 이용되고 있다(Bicknell et al., 2001). 또한 HSPF는 다른 모형과 달리 침식, 오염물질간 상호 반응, 지하수 수질등의 모의 기능을 갖고 있으며, 특히 불투수지역과 투수지역 등 도시 및 농촌 유역이 혼재된 복합 유역에 적용이 가능하며 구성이 복잡한 유역에 대하여 적용이 가능하기에 본 연구에서는 HSPF 모형이 더 적합하다 판단하였다. 국내에서는 Jang et al. (2005) 등이 유출량산정을 위해 HSPF 모형을 사용하였으며, Jung et al. (2007), Lee et al. (2012) 등이 수계내의 비점오염원 부하량 산정을 위해 HSPF 모형을 활용하였다. Yoon et al. (2007), Liu and Tong (2011), Shenk (2012) 등은 HSPF 모형을 활용하여 최적관리기법인 Best Management Practice (BMP) 적용에 따른 시나리오 분석을 실시하기도 하였다.

본 연구에서는 유역유출모델인 HSPF 모형을 이용하여 하천으로 유입되는 비점오염원 저감을 위해 수변구역에 설치 가능한 최적관리모델인 Best Management Practice (BMP) 요소기술로써 금호강 유역에 정화림을 선정하여, HSPF 하위모델인 Best Management Practices Evaluation (BMPRAC)를 적용하여 유역내 정화림의 설치 면적에 따른 수질개선 효과를 분석하였다. 이러한 연구를 통하여 비점오염원 관리가 필요한 유역의 비점오염원 관리 방안을 위한 대책으로 BMP 적용의 적절성을 제시하고자 한다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 조사 대상 유역

본 연구 대상지인 금호강 유역(Fig. 1)은 경상북도 포항시 북구 중잔면이 발원지인 낙동강 지류로써, 하천을 따라 농업 지대가 형성이 되어 있으며 하류부인 대구광역시를 중심으로 급격한 도시화가 진행된 유역이다. 급격한 도시화 및 영천댐의 조성으로 인해 약해진 물줄기로 인해 오염이 가속화되고 있어 지역 내 환경 문제로 대두되고 있다. 유로연장 119 km, 하천 총 길이 6,179 km인 금호강 유역의 수계밀도)

(Drainage density)는 2.95로 신속한 호우응답을 나타내며, 강우가 하천으로 모이는 정도를 나타내는 수계빈도)는 4.25로 강우로 인한 유량 중 하천으로 유입되는 양이 많은 것으로 나타났다(ME, 2016).

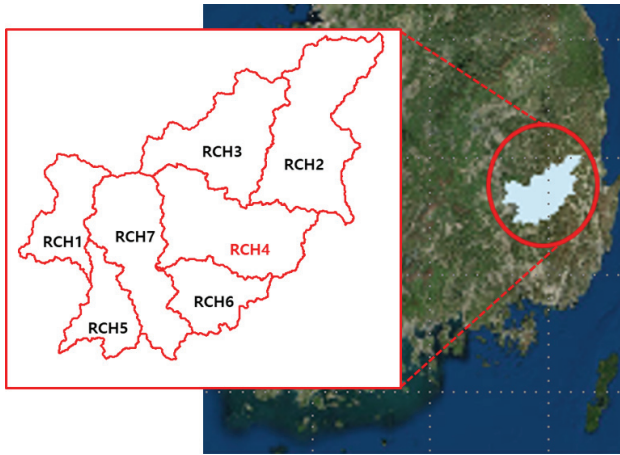


Fig. 1. Location of Case-study Area at Kumho River Watershed in Korea

2.2 시나리오 설정

HSPF 모형을 통해 구축된 금호강 유역을 대상으로 BMPRAC 모듈을 활용하여 정화림 설치에 따라 비점오염원 물질 중 수질오염총량제도에서 오염총량 관리대상 오염물질인 BOD와 TP의 저감효율을 산정하고자 한다. 시나리오 적용 대상지인 RCH4 (Fig. 1) 유역은 수질 및 수위 관측소가 위치하고 있어 모형 검·보정의 대상지이며, 도시지역인 말단부를 제외하고 현재 BOD, TP 수질농도가 각각 4.1 mg/L, 0.137 mg/L의 보통등급(BOD 5 mg/L 이하, TP 0.2 mg/L 이하)의 수질을 나타내고 있어 비점오염원의 관리로 수질등급 상향 조절이 필요하다고 판단하였다. 해당 유역에 설치하는 BMP인 정화림은 10,000, 20,000, 40,000, 160,000, 320,000 m²로 총 5개의 면적 시나리오로 설정하였으며 각 시나리오 면적에 따른 비율을 계산하여 비점오염원(BOD, TP) 저감효율을 산정하였으며, 비점오염원 저감을 위한 BMP 적용의 적절성을 확인하고자 한다.

2.3 HSPF 모형 이론

준분포형 장기 유출모델인 HSPF는 미국 환경청(United States Environmental Protection Agency, U.S. EPA)에서 만들어졌으며, 많은 입력 자료의 구축 및 모형 적용을 위해 여러 소프트웨어 기능들이 추가, 개발된 유역모형이다. HSPF는 기본적으로 3개의 Application 모듈과 5 개의 Utility 모듈로 이루어져 있다. Application 모듈의 PERLND, IMPLND 하위

모듈이 각각 투수 및 불투수 지역의 강우에 의한 유출량과 비점오염원에 대한 모의를 하며, 모의된 결과를 RCHRES 모듈에서 하천의 수리 및 오염물질에 대한 모의를 수행한다. HSPF 모델은 각 소유역 및 토지이용특성에 따라 수문-유출 특성을 정의할 수 있으며, 강우에 따른 유출유량은 수체로 이동되어 저류추적방법에 의해 하류로 전달된다. HSPF 모델에서의 수문유출은 불투수지역 및 투수 지역에서 각기 다른 방식으로 모의되며, 불투수 지역에서는 지표유출만 발생시키나, 투수지역에서는 지표유출, 중간유출 및 기저유출을 각각 발생시킨다. HSPF 모델에서 지표유출은 난류과정으로 간주되며, Chezy-Manning식 및 저류량에 따른 유출량 관계식에 의해 모의된다(Bicknell et al., 2001).

본 연구에서는 HSPF 모형 구축 과정에서 하위모델인 BMPRAC모듈을 추가함으로써 항목에 따른 제거율을 입력하여 BMP에 따른 오염물질 제거효율을 모의하는 것이다. 즉, Bioretention, filter strip 등의 비점오염원 저감시설을 적용하였을 경우 각 시설에 따라 제거율을 지정하여 결과값을 모의 할 수 있다. 그러나 BMP 적용을 통한 오염물질의 저류와 제거 효과에 있어서는 단순한 형태로만 모의가 가능하게 되어있기 때문에 복잡한 제거기작은 포함되지 않는 단점이 있다. BMPRAC 모듈에서의 오염물질 제거 기작은 다음 Eqs. (1), (2)과 같다.

$$REMOVE = FRAC \times INPUT \quad (1)$$

$$OUTPUT = INPUT - REMOVE \quad (2)$$

여기서, REMOVE=mass removed

FRAC=fraction to removed

INPUT=inflow mass

OUTPUT=outflow mass

2.4 입력자료 및 유역 구축

2.4.1 기상 및 환경기초시설

HSPF 구축을 위해 필요한 기상자료를 .wdm (watershed data management) 파일의 형태로 저장하기 위해 2012-2015년 까지의 기상자료(강수량, 기온, 이슬점 온도, 풍속, 일사량 등)를 HSPF의 보조프로그램인 WDMUtil을 활용하여 .wdm 파일 형태로 변환하였다. 증발산량의 경우 기상청에서 제공하지 않는 경우가 많아 Penman pan 방법으로 산정하여 입력 자료를 구축하였다.

HSPF 모델의 오염원 입력자료는 전국오염원조사 자료로부터 산정하여 입력하였다. 오폐수 발생량과 배출 부하량 자료를 점오염부하량 입력자료로 사용하였으며, 일평균 방류량이 100 m³ 이상인 하수종말처리시설 및 마을하수도등의 환경기초시설에 대해 일별 방류량과 방류수질(DO, BOD, TN, TP) 자료를 입력하였으며, 이를 질소와 인의 형태별 비율을 산정하여 WDMUtil를 활용하여 입력자료로 구축하였다.

1) 수계밀도: 일정한 유역 내를 흐르는 하천의 총 연장을 유역면적으로 나눈값

2) 단위면적당 하천수(하도의 수/유역 면적)

2.4.2 지형정보 자료

HSPF을 구축하기 위해서 BASIN 프로그램을 활용하였으며 지형공간정보자료인 Digital Elevation Model (DEM, Fig. 2a), 토지이용도(Fig. 2b)유역도 및 하천도(Fig. 2c) 등을 활용하여 유역분할을 실시하였다. DEM의 경우 국토지리정보원에서 제공하는 30 × 30 m 해상도를 사용하였으며, 하천도는 물환경정보시스템에서 제공하는 Korea Reach File (KRF)를 활용하였다. 토지이용도는 환경공간정보서비스에서 제공하는 세분류 토지피복도를 활용하여 도시, 농업, 산림, 초지, 나지, 습지, 수역 등 7개의 대분류로 재분류 하였다. 재분류 결과 금호강 유역의 전체 면적 중 63.42%가 산림지역이며, 16.15%는 농업지역, 8.85%는 도시지역으로 나타났다. 유역분할은 Watershed Delineation (Automatic) 모듈을 활용하였으며 금호강 유역을 7개의 유역으로 분할하였다(Fig. 2d).

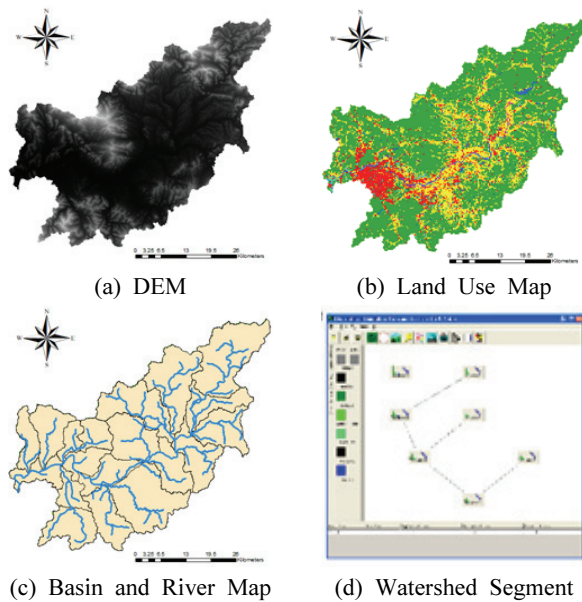


Fig. 2. Topographic Information Data

2.5 모형의 검·보정

HSPF모형의 검·보정은 모형의 초기조건과 매개변수를 허용범위 내에서 변화시키면서 모의값을 측정값에 일치시키기 위해 매개변수를 조정하여 일치정도를 확인하는 단순시행착오법을 이용하여 실시하였다. 본 연구에서 사용된 주요 매개변수의 범위는 U.S. EPA에서 작성한 HSPF Technical note와 HSPF Version 12 User's Manual (Bicknell et al., 2001)에 제시되어 있다. 유량 및 수질 검·보정에 사용된 매개변수 중 항목별로 가장 영향력이 큰 매개변수들을 Table 1에 나타내었다.

HSPF 모형의 검·보정한 결과를 평가하기 위해 유량의 경우 회귀선이 실제관측치를 어느 정도 대표하여 그 적합성을 보여주고 있는가를 측정하는 계수인 결정계수 (R^2)를, 수질의 경우 모의치와 실측치의 차이를 두 값의 평균으로 나눈 값 %difference를 사용하였다. 다음 Eqs. (3), (4)는 R^2 와 %difference의 관계식을 나타낸다. 상관계수 R^2 는 1에 가까울수록 구축된 모형의 정확도가 높음을 나타내고 있으며 %difference는 0에 가까울수록 관측값과 모형값이 유사함을 나타낸다.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}) \right]^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (3)$$

$$\% \text{ difference} = \frac{\left| \sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right|}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad (4)$$

P_i : 예측값, O_i : 실측값,
 \bar{P} : 예측값의 평균, \bar{O} : 실측값의 평균
 n : 데이터수

Table 1. HSPF Parameters for Calibration and Validation

	Parameter	Definition	unit	Typical Range
FLOW	LZSN	Lower Zone Nominal Soil Moisture Storage	in	3.0 - 8.0
	UZSN	Upper Zone Nominal Soil Moisture Storage	in	0.10 - 1.0
	INFILT	The Infiltration Capacity of the Soil	in/hr	0.01 - 0.25
	LZETP	Lower Zone ET Parameter	-	0.2 - 0.7
	INTFW	Interflow Inflow Parameter	-	1.0 - 3.0
BOD	BRBOD 1	Base release rate of BOD materials	mg/m ²	>0.0001
	BRBOD 2			
	BODOX	Dissolved oxygen	mg/L	-
	BOD	Biochemical oxygen demand		-
TP	PO4	Initial concentrations of total ortho-phosphorus	mg/L	-
	BROPO41	the benthal release rate of ortho-phosphate under aerobic conditions	mg/m ² /hr	-
	BROPO42	the benthal release rate of ortho-phosphate under anaerobic conditions	mg/m ² /hr	-

모형의 안정성을 위해 2012년부터 2015년 까지 모형을 구동하였으며 검·보정 기간은 2013-2014년으로 설정하였다. 모형의 검·보정 지점은 모델링 지점과 동일하며 유량 및 수질 관측지점을 모두 보유하고 있는 RCH4 지점을 대상으로 실시하였다. 유량의 경우 검·보정 지점 유역에 위치한 금호 수위측정망 지점의 수위-유량관계곡선식을 이용하여 재산정된 유량자료를 활용하여 실시하였으며, 수질(BOD, TP)의 경우 물환경정보시스템에서 제공하는 금호강1A 하천 수 수질측정망 지점에서 8일간격의 수질자료를 활용하였다. Table 2에는 모델의 효율성을 평가하기 위한 R^2 와 %difference의 범위 및 목표치에 대한 일반적인 가이드라인이 표기되어 있다(Donigian, 2000).

Table 2. R^2 & %difference Range

	Very good	Good	Fair	Poor
%difference water quality	<15	15~25	25~35	-
R^2				
Daily water flow	0.90~0.80	0.80~0.70	0.70~0.60	0.60~0.50

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 모델링 검·보정 결과

유량은 토사유출에 영향을 주는 인자이며, 토사에 흡착되어 하천에 유입되는 오염물질과 밀접한 관계가 있으므로 수질항목의 보정을 위해서는 정확한 유량의 보정이 선행되어야 한다(Im, 2003). 따라서 모형의 검·보정은 유량, BOD, TP 순으로 진행하였으며 각 항목별 변화에 많은 영향을 주는 인자들의 매개변수를 중심으로 검·보정을 실시하였다.

검정결과 유량의 경우 R^2 값이 0.816 (Very good), 검증결과 R^2 값은 0.863(Very good)으로 산정되었다. 이는 Table 2의 R^2 범위에 근거하여 Very good 으로 산정되었으며, 모의 값이 강우에 따른 연도별 유량변화와 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있으며(Fig. 3b) 모의치가 실측치를 잘 반영한다고 할 수 있다.

수질항목인 BOD 경우 검정결과 %difference 값이 14.11 (Very good), 검증결과 3.84(Very good)으로 산정되었으며, 모의 값이 강우에 따른 연도별 수질변화와 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있으며(Fig. 3c) 모의치가 실측치를 잘 반영한다고 할 수 있다. 반면, TP의 경우 검정결과 %difference 값이 17.69 (Good), 검증결과 18.39 (Good)로 산정되었으며

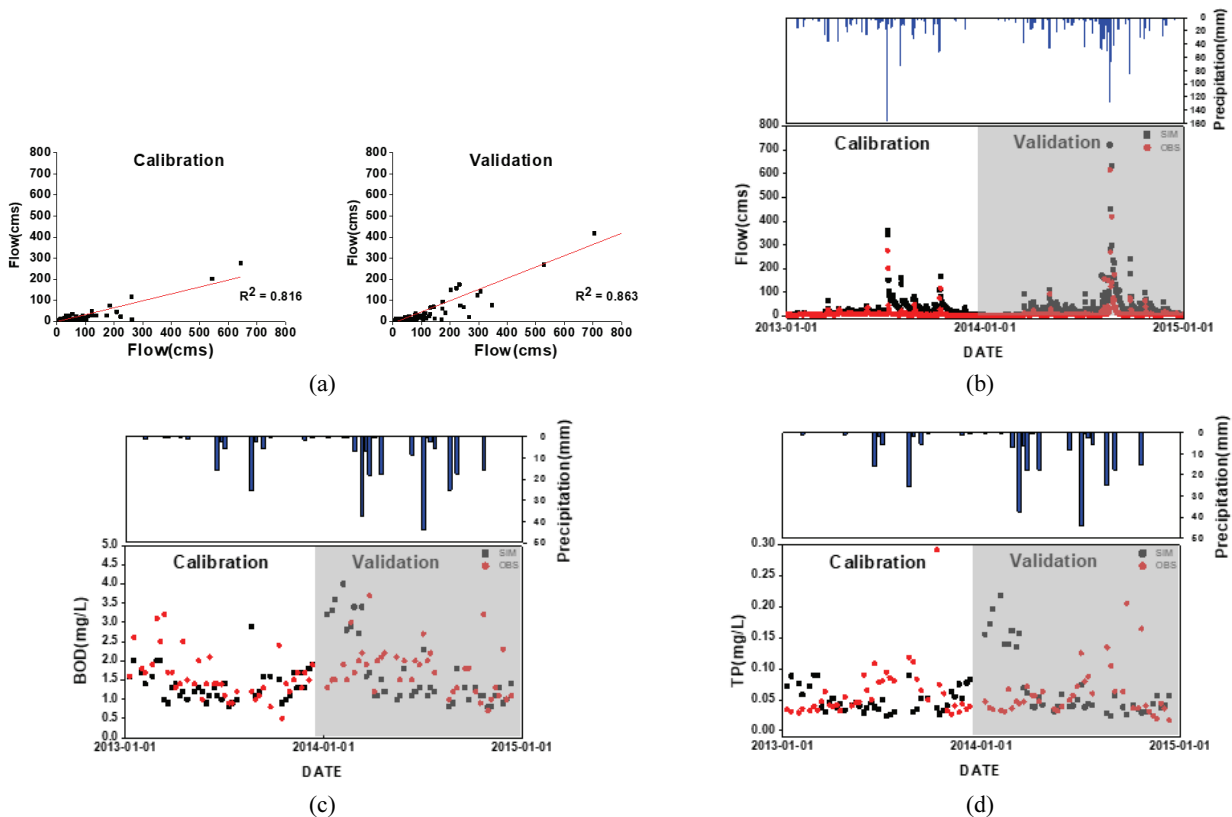


Fig. 3. The Result of Calibration and Validation: (a) Scatter Plot of Flow Calibration and Validation Result. Variation Trend of Simulated / Measured Values Dependent on (b) Flow, (c) BOD, (d) TP of Rainfall. Note that year 2013 to 2014 is the Calibration Period, and 2014 to 2015 is the Validation Period

모의 값이 강우에 따른 연도별 수질변화와 유사한 경향을 보이거나 이상치가 존재함을 확인 할 수 있으며(Fig. 3d), 이는 유역 내 복잡한 토지이용 및 점오염원을 고려할 때 허용할 수 있는 범위 내에서 수질의 모의한 것으로 판단된다.

이러한 결과는 모형의 검·보정에 사용하는 매개변수들은 유역의 특성을 정확히 반영한 값을 산정하는 것이 중요하지만 유역의 정보를 반영하기 위한 수리·수문학적 자료의 부족으로 생긴 결과라 사료된다. 특히, 수질 검·보정에 사용된 금호강1A 지점에서 측정된 수질 자료는 8일 간격의 관측자료이기에 시간해상도가 낮아 하천의 특성을 완전히 반영하기에 부족한 분석에서 나온 결과라 할 수 있다. 또한 BASINS 프로그램을 활용하여 분할한 7가지의 유역은 DEM, 하천도, 유역도를 반영한 결과로서 실제 유역 경계와는 다소 다른 유역 경계를 나타내므로 이 또한 오차발생의 원인 중 하나라 생각된다. 향후 연구에서 HSPF 모델의 정확한 보정을 위해서는 검·보정 대상지 유역의 특성을 대표할 수 있는 수질 및 유출량 자료의 측정 및 확보가 중요함을 알 수 있다.

3.2 시나리오별 비점오염원 저감효율 분석

HSPF 모형으로 구축된 금호강 유역 내 RCH4 지점을 대상으로 정화림 설치에 따른 비점오염원 저감효율을 분석하였다. 정화림 면적을 10,000, 20,000, 40,000, 160,000,

320,000 m²로 가정하여 시나리오 1~5로 구성하였으며, 정화림 적용 전·후에 대한 수질 농도 변화를 바탕으로 비점오염원 저감효율을 산정하였다. Fig. 4는 정화림의 비점오염원 저감효율을 산정하기 위해 정화림 적용 전·후의 수질 결과를 강우에 따른 시계열 분석 결과를 나타낸다. 강우에 따른 비점오염원 농도 변화 추이를 보면 선행강우가 없는 시기에 다량으로 축적된 비점오염원이 매우 작은 강우에 다량으로 하천으로 유입되어 비점오염원농도가 높은 것을 확인 할 수 있다. 이는 강우량이 부족한 겨울-봄 시기에 비점오염원 농도가 높은 경향과 유사함을 나타낸다.

Fig 4에서 확인 할 수 있듯이 강우량이 많을 때는 정화림 면적이 증가함에 따라 비점오염원 저감률이 큰 폭으로 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 무강우 혹은 강우량이 적은 경우(<10 mm)에는 하천으로 유입되는 오염원량이 적어 정화림 면적이 증가하더라도 비점오염원 저감률의 변화는 미비함을 확인 할 수 있다. 반면 강우량이 높은 경우에는 하천으로 유입되는 오염원량이 증가하여 비점오염원 저감률이 증가하는 것으로 판단된다. 또한, 모형의 구동 기간인 2013년~2014년 동안 측정된 강우량의 90% 이상은 30 mm 이하의 강우이기에 비점오염원 저감효율 산정은 30 mm 이하의 강우를 기준으로 산정하는 것이 적합하다 판단하여, 10 mm ~ 30 mm 강우를 기준으로 저감효율을 산정하였으며 그 결과는 Table 3에 나타내었다.

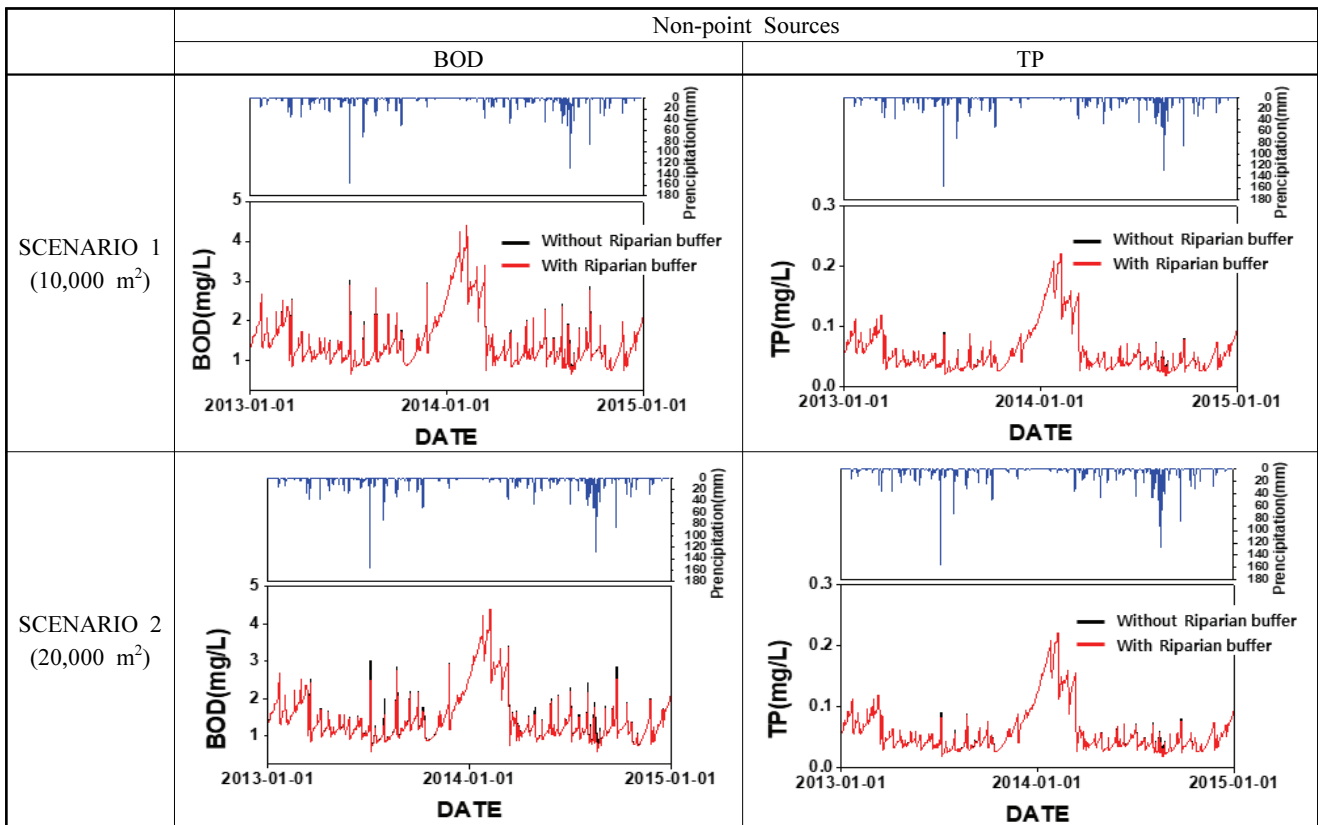


Fig. 4. Improved Water Quality on Riparian Buffer Area

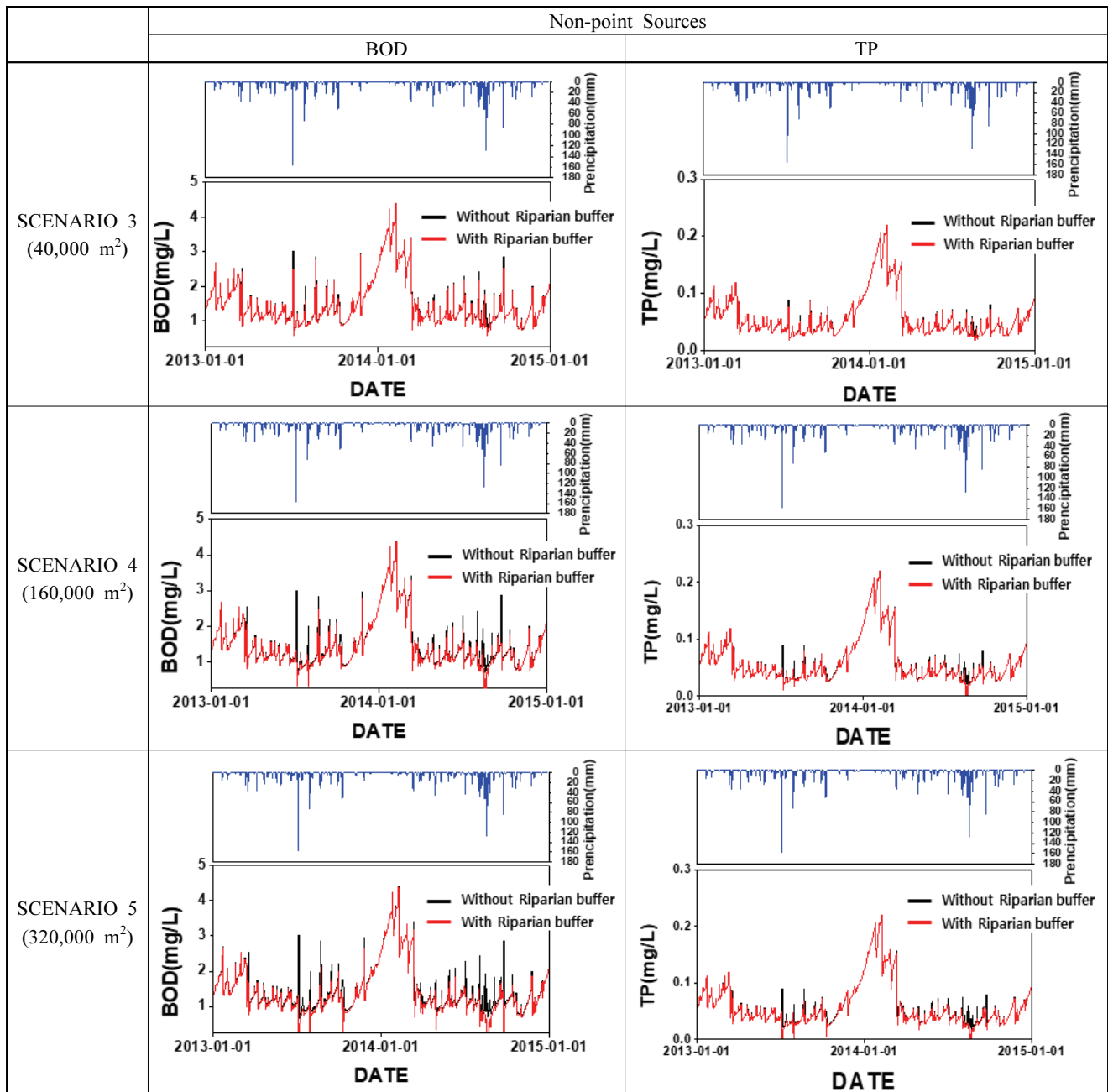


Fig. 4. (Continued)

Table 3. Non-point Source Reduction Efficiency by Scenarios

	Reduction Efficiency (%)									
	Scenario 1 (10,000 m ²)		Scenario 2 (20,000 m ²)		Scenario 3 (40,000 m ²)		Scenario 4 (160,000 m ²)		Scenario 5 (320,000 m ²)	
rainfall (mm)	BOD	TP	BOD	TP	BOD	TP	BOD	TP	BOD	TP
0<R≤10	0.16	0.08	0.32	0.17	0.63	0.34	2.53	1.36	5.04	2.71
10<R≤20	0.42	0.30	0.84	0.61	1.69	1.22	6.74	4.88	13.48	9.76
20<R≤30	0.55	0.42	1.11	0.86	2.22	1.71	8.85	6.85	17.69	13.71
R≤30	0.22	0.14	0.45	0.28	0.90	0.57	3.62	2.28	7.24	4.57

면적 시나리오에 따른 비점오염원(BOD, TP) 저감효율(%)을 확인해보면 정화림 면적이 증가할수록 비점오염원 저감효율 또한 증가하는 경향을 보인다. 면적 시나리오 중 가장 넓은 면적인 320,000 m²의 경우, 높은 강우사상인 20~30 mm에 대해 BOD 평균 17.69%, TP 평균 13.71%의 저감효율을 보이고 있으며 30 mm 이하의 모든 강우사상에 대해서는 평균 BOD 7.24%, TP 4.57%의 저감효율로 매우 낮은 수치를 보이고 있다. 정화림 적용에 따른 비점오염원 저감효율이 낮게 산정되었지만, 이는 시나리오로 적용한 320,000 m²의 정화림 면적이 모의 대상지인 RCH4 소유역 면적의 0.084%로 매우 작은 면적을 적용한 결과라 할 수 있다. 그러므로 기존 면적 시나리오 이상의 면적 시나리오를 설정하여 추가 모의함으로써 금호강 유역에 효율적으로 적용가능한 정화림 면적이 산정 될 것으로 사료된다. 비록 비점오염원 저감효율이 낮게 산정되었으나 BMP 기술의 일종인 정화림이 비점오염원을 저감 및 관리 하기 위한 대책으로 적용이 가능함을 보여주는 결과라 사료된다.

4. 결론

금호강 유역의 비점오염원 저감을 위해 비점오염원 저감 시설의 일종인 정화림을 선정하여 수질개선효과를 모의하기 위해 유역유출모델인 HSPF 모형을 이용하여 평가, 분석하였다. 정화림 면적에 따른 시나리오를 설정하여 비점오염원(BOD, TP) 저감효율을 산정하였으며 모형의 효율성의 평가하기 위해 단순시행착오법으로 검·보정을 실시하였다. 검·보정 결과 R²와 %difference의 범위 가이드라인에 따라 FLOW, BOD는 Very good, TP는 Good 등급을 보여 모의치가 실측치를 잘 반영한다고 할 수 있다. 하지만 수질 검·보정 시 낮은 시간 해상도의 수질데이터로 인해 하천의 수질 현황을 전부 반영하지 못했으므로 이에 따른 오차가 발생했을 것으로 보이며 정확한 모의를 위해 높은 시간해상도의 검·보정 데이터가 필요할 것으로 보인다.

HSPF의 하위모델인 BMPRAC를 이용하여 모의한 결과, 정화림 면적이 증가함에 따라 비점오염원 저감효율 또한 증가하는 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 320,000 m²의 경우 강우사상 20~30 mm 일 때, 평균 BOD 17.69%, TP 13.71%의 저감효율을 보이고 있으며 30 mm 이하의 전체 강우사상에 대해서는 평균 BOD 7.24%, TP 4.57%의 낮은 저감효율을 보이고 있다. HSPF 모의로 산정된 저감효율은 20% 미만으로 낮게 산정되었으나 이는 320,000 m²의 정화림 면적이 RCH4 유역의 0.084%로 매우 작은 면적이기에 산정된 결과라 할 수 있다. 이러한 결과는 시나리오별 모의 결과 산정된 비점오염원 저감효율은 실제 유역에 적용하기에 낮은 수치를 보이나 비점오염원 저감 및 관리를 위한 대책으로 BMP 기술의 일종인 정화림 적용이 적절함을 보여주는 것으로 사료된다.

금호강 유역에 적용하기 위한 정화림 면적 산출은 320,000 m² 이상의 추가 모델링을 실시하여 산출하되, 정화림 면적이 증가함에 따라 비점오염원 저감효율도 증가하는 경향을 보이므로 최대효율을 보이는 최소면적의 정화림 적용 면적을 산정하는 연구가 필요할 것으로 보이며, 검·보정 시 유역의 수리수문학적 특성을 반영하여 모델의 정확도를 높일 필요가 있다.

HSPF 모형을 사용한 해당 연구는 장기적 모니터링이 필요한 비점오염원 저감시설의 비점오염원 저감효율을 정량적으로 평가 할 수 있을 자료로 사용할 수 있을 뿐만 아니라 추후 정화림을 설치할 목적으로 사전 검토가 필요한 유역에 의사 결정 자료로써 사용할 수 있을 것이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 환경정책기반공공기술개발사업에서 지원받았습니다(2016000200003).

References

- Beasley, D.B., and Huggins, L.F. (1981). *ANSWERS, areal nonpoint source watershed environment response simulation: Users manual*. EPA 905/9-82-001. U.S. Environmental Protection Agency, Chicago, IL.
- Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Jobs T.H., and Donigian A.S. (2001). *Hydrological simulation program fortran, user's manual for release 12*. U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Athens, GA.
- Donigian, Jr., A.S. (2000). *HSPF training workshop handbook and CD*. Lecture #19. Calibration and Verification Issues, Slide #L19-22.
- Shenk, G.W. (2012). Enhanced HSPF model structure for chesapeake bay watershed simulation. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 138, No. 9, pp. 949-957.
- Hyun, G.H. (2010) The Way to go for a Low-carbon city-LID (Low impact Development). *Geoenvironmental Engineering*, Korean Geo-Environmental Society, Vol. 11, No. 6, pp. 5-12.
- Im, S.J., Brannan, K.M., Mostaghimi, S., and Cho, J.P. (2003). Predicting runoff and sediment yield on a forest dominated watershed using HSPF and SWAT models. *Journal of Korean Society of Rural Planning*, Vol. 9, No .4, pp. 59-64.
- Jung, K.W., Yoon, C.G., Jang, J.H., and Kim, H.C. (2007). Quantitative estimation of pollution loading from

- Hwaseong watershed using BASINS/HSPF. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 49, No. 2, pp. 61-74.
- Jang, J.H., Yoon, C.G., Jeon, J.H., and Jung, K.W. (2005). A study of runoff prediction in Yongdam watershed with HSPF. *Proceedings of Spring Conference*, Korean Society of Water Quality, Vol. 2005, pp. 202-206.
- Korea Environmental Industry and Technology Institute (KEITI). (2014). *Technology development for the establishment of riparian greenspaces and eco-corridors*. EW-31-07-10, KEITI.
- Korea Environment Institute (KEI). (2000). *A study on the construction and management of waterside green area for water quality improvement*. KEI/2000/RE-06, KEI.
- Knisel, W. G. (1980). *CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*. Conservation Research Report, No. 26, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.
- Kwun, S.K. (1998). Management improvement and perspective on nonpoint sources of water pollution in Korea. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 20, No. 11, pp. 1497-1510.
- Lee, J.W., Kwon, H.G., Yi, Y.J., Yoon, J.S., Han, K.Y., and Cheon, S.U. (2012). Quantitative estimation of nonpoint source load by BASINS/HSPF. *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 21, No. 8, pp. 965-975.
- Liu, Z., and Tong, S.T.Y. (2011). Using HSPF to model the hydrologic and water quality impacts of riparian land-use change in a small watershed. *Journal of Environmental Informatics*, Vol. 17, No. 1. doi:10.3808/jei.201100183
- McBride, M., Hession, W.C., Rizzo, D.M. (2008). Riparian reforestation and channel change: A case study of two small tributaries to Sleepers River, northeastern Vermont, USA. *Geomorphology*, Vol. 102, No. 3-4, pp. 445-459.
- Ministry of Environment (ME). (2016). *A study on the influence of nonpoint sources on Kumho River basin*.
- United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA). (2001). *WinHSPF Version 2.0 User's Manual*. Contract No. 68-C-98-010, U.S. EPA, Washington, DC.
- Yoon, C.K., Han, J.Y., Jung, K.W., and Jang, J.H. (2007). Application of BASINS/WinHSPF for pollutant loading estimation in Soyang Dam watershed. *Korea Journal of Limnology*, Vol. 40, No. 2, pp. 201-213.

Received	December 4, 2018
Revised	December 6, 2018
Accepted	December 12, 2018