

## HSPF 모형을 이용한 축산계 비점오염 저감에 따른 합천댐 유역 수질 영향 분석

조현경<sup>1</sup> · 김상민<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 대학원 농공학과 · <sup>2</sup>경상대학교 지역환경기반공학과 (농업생명과학연구원)

### Estimation of Livestock Pollutant Sources Reduction Effect on Water Quality in Hapcheon Dam Watershed Using HSPF Model

Hyun Kyung Cho<sup>1</sup> · Sang Min Kim<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School, Gyeongsang National University

<sup>2</sup>Department of Agricultural Engineering (Institute of Agriculture and Life Sciences), Gyeongsang National University

(Received 27 September 2019, Revised 13 February 2020, Accepted 17 February 2020)

#### Abstract

The purpose of this study was to evaluate water quality in Hapcheon dam via using the Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) model and applied livestock reduction scenarios. Hapcheon dam watershed input data for the HSPF model were established using the stream, land use, digital elevation map and meteorological data and others. The HSPF model was calibrated and validated using the observed water quality data from 2000 to 2016. For water quality simulation, we calculated the generated and discharge loads of the population, livestock, industry and land use following the guideline provided by the Ministry of Environment. The pollutant data were obtained from National Institute of Environmental Research (NIER). The monthly discharge load were estimated by applying the delivery rate. The calibration and validation results showed that the annual mean BOD had a difference of 0.22 mg/L and an error of  $\pm 13\%$ , T-N had a difference of 0.66 mg/L and an error of  $\pm 16\%$  and T-P had a difference of 0.027 mg/L and an error of  $\pm 13\%$ . In order to evaluate the nonpoint pollutants management effects, we applied livestock reduction scenarios because livestock consists of the largest portion of pollutants. As a result of the 20% of livestock reduction, BOD, T-N and T-P decreased by 3%, 1% and 3%, respectively. When 40% of livestock reduction was applied, BOD, T-N and T-P decreased by 5%, 3% and 4%, respectively. Based on the results of this study, effective pollutant management methods can be applied to improve the water quality and achieve the target water quality of Hapcheon dam watershed.

**Key words** : Discharge load, Generated load, Hapcheon dam, HSPF, Nonpoint source, Reduction scenarios

<sup>1</sup> 박사과정(Ph.D. Student), gusrud708@gnu.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0001-9922-0377>

<sup>2,\*</sup> Corresponding author, 교수(Professor), smkim@gnu.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0003-0951-1715>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 1. Introduction

최근 급격한 인구증가와 산업발달로 인하여 수자원 확보와 수질관리가 주요 관심사가 되고 있는 가운데 유역 내 하천이나 호소의 수질개선을 위한 비점오염원에 대한 관리가 주요한 관심사로 고려되고 있다. 총량오염제의 시행으로 단위유역별 목표수질을 설정하고 이를 달성하기 위해 하수처리장과 하수관로 정비 등 점오염원은 지속적으로 관리되어 왔으나 상대적으로 비점오염원은 관리가 미흡한 실정이다(Jeon et al., 2010). 그 동안의 농업지역 비점오염물질 저감 대책은 논과 밭과 같이 농경지에 관한 것이 대부분이었으며, 상대적으로 높은 비중을 차지하는 축산은 가축분뇨 발생부터 처리, 유통에 이르기까지 다양한 경로를 통해 비점오염물질을 배출하고 있으나 관리주체가 모호하여 정량화되고 체계적인 시스템이 구축되지 않고 있다(NIER, 2008).

축산시설은 폐수처리와 재활용 시설이 운영되고 오염물질 배출지점이 일정하여 점오염원으로 분류되어 있지만, 부실한 관리로 강우유출수와 함께 배출되는 분뇨들은 비점오염원의 일부로 정의되고 있다. 축산농가로부터 발생하는 미처리 배출수는 공공처리시설의 배출수 수질과 비교하여 7 ~ 28배의 고농도로 하천에 유입되고 수질 및 수생태계에 치명적인 영향을 줄 수 있는 물질을 다량 포함하고 있어 축산비점오염물질 정량화와 수질영향 평가의 필요성은 더욱 커지고 있다(Won et al., 2011). 또한 수질총량오염제의 평가 수질항목인 T-P의 주요원인으로 축산계 비점오염원이 지목되어 수계의 녹조 발생의 원인으로 꼽히고 있다(Oa, 2018).

축산 비점오염원의 정량화를 위한 연구사례를 살펴보면 ME (2012)는 새만금 유역의 가축분뇨관리 문제점 및 수질영향에 대한 정량화를 시도하였으며, NIER (2013)은 논산지역에 대한 가축분뇨 환경영향조사를 통해 부숙도 개정 또는 냄새물질 기준설정을 한 바 있다. 축산계의 비점오염물질이 수

계에 미치는 영향을 연구한 사례로는 Lee et al. (2015)이 유역말단에서 발생한 비점오염물질을 모니터링하여 비점오염물질이 소유역에 미치는 기여도를 분석하고자 하였으며, Lee et al. (2009)는 강우시에 농지표면에 직접 유출되는 유출수의 특성을 파악하고 수계로 유출되는 축산 비점오염원의 비율을 산정하였으며, Cho (2015)는 오염부하량을 산정하여 HSPF를 이용한 축산비점오염의 수질영향을 파악하고자 하였다. 축산계의 비점오염부하량을 산정하여 수질영향을 파악한 연구들이 진행되고 있으나 모델링을 사용하여 수질영향을 평가하거나 축산비점오염원의 저감시나리오를 수립한 연구는 미진한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 낙동강 수계 내 연구팀과 인접하며 다른 지역에 비해 상대적으로 소와 닭의 사육두수가 높은 단위유역인 합천댐 유역을 연구지역으로 선정하여 HSPF 모형을 이용하여 유출량, 유출율 및 유출특성을 분석하였다. 다음 비점오염원을 생활계, 축산계, 산업계로 구분하고 읍면동 단위의 인구수, 사육두수 등을 이용하여 소유역별 배출량을 정량화하고 수질특성을 분석하기 위한 오염원별 수질오염 기여도를 분석하였다. 그 중 전체오염원 중 가장 많은 비율을 차지하는 비점오염 관리의 핵심인 축산계의 배출부하량 저감을 위한 저감대책 시나리오를 20%, 40% 저감으로 수립하여 시나리오별 수질개선 효과를 분석하고자 한다.

### 2. Materials and Methods

#### 2.1 대상유역

연구 대상유역인 합천호는 경상남도 합천군 대병면에 위치하고 있으며, 낙동강 하류지역의 생활 및 공업용수, 농업용수를 공급하고 산업 시설과 농경지의 홍수피해를 조절하기 위하여 낙동강 지류인 황강에 건설된 다목적댐 저수지이다. 합천댐 유역의 면적은 929 km<sup>2</sup>, 총 저수용량이 7억 9,000만

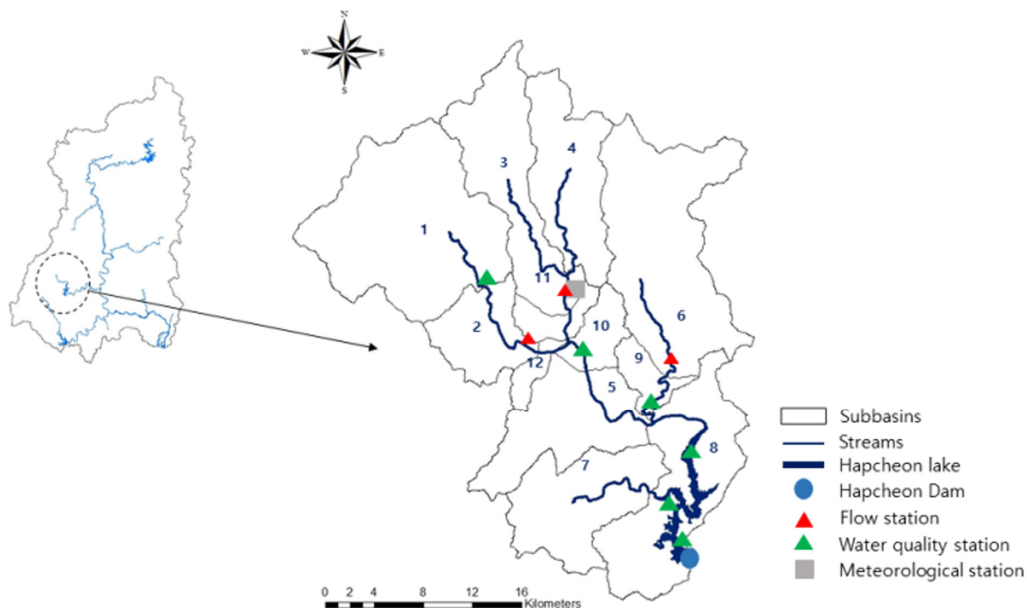


Fig. 1. Location of monitoring stations and sub-watershed of Hapcheon dam watershed.

m<sup>3</sup>, 저수면적은 25 km<sup>2</sup>, 저수지 길이는 30 km, 최대 수심은 약 80 m이다. 용수공급능력은 연간 5억 9,900만 m<sup>3</sup>이며, 부산, 창원, 마산, 진해 등 낙동강 하류지역에 용수를 공급하고 있다. 합천댐 유역은 청정지역으로 알려져 있지만 매년 여름철 태풍의 영향과 주변 농경지의 토사 유출로 인해 장기간 이어지는 탁수현상이 보고되고 있다(Kim and Kang, 2013). 탁수현상은 댐 하류 생태계의 변화, 하천이용도 저하, 하류지역 정수처리 비용 증가 등의 많은 문제점을 발생시킨다(Hwang et al., 2005). 또한 유역 하단에 용량이 8000만 m<sup>3</sup>인 합천댐이 위치하고 있어 수문 및 수질관리가 매우 중요하다.

## 2.2 모형입력자료

수문과 수질모델링을 위해 필요한 입력자료는 기상자료, 수질농도, 수위, 유량자료, 유역도, 하천도, 수치지표고지도(DEM), 토지피복도이며, HSPF의 BASINS를 이용하여 2000년 ~ 2016년의 유출량과 수질을 모의하였다. 수위, 유량, 그리고 유입량, 유역도는 국가수자원종합정보시스템(HRFCO, 2018)에서 수집하였으며 수질자료는 물환경정보시스템(ME, 2018)에서 수집하였다. HSPF에서 사용되는 소유역은 유역도와 관측소를 기준으로 WinHSPF를 통해 나누어지며 stream network는 하천도를 기준으로 수계의 흐름이 정의된다. HSPF 적용을 위해 기상자료와 오염원자료, 수질자료 등이 필요하며 기상자료는 시간단위 강수량과 일단위 온도, 풍속, 일사량 등을 기상청에서 수집한 후 WDM 파일형태로 변환시켜 UCI(User's Control Input) 파일을 통해 입력하였다. 수질자료는 물환경정보시스템에서 제공하는 합천댐에 위치하는 총량측정망에서 측정된 자료이며, BOD, T-N, T-P 세 가지를 수집하였다. 점오염원과 비점오염원 자료는 환경부에서 제공하는 수계오염 총량관리기술 지침을 기초로 각 소유역별 생활계, 산업계, 축산계, 매립계, 양식계에 대해 산정하였으며 모형에 사용된 것은 생활계와 축산계이다. HSPF 모형으로 매개변수를 조정하여 유출량과 점오염원을 고려한 수질을 예측하고, 비점오염원을 적용시켜 수질을 예측하였다. 실측 수질농도와 비교하였으며, 비점오염원 중 축산계의 저감시나리오를 적용시켜 수질의 변화양상을 비교분석하였다. 모형의 효율을 평가하기 위해 수문은 평가지표(R<sup>2</sup>, RMSE, RMAE, NSE), 수질은 평가지표(RMSE, RMAE, PBIAS)를 이용하여 적용성 평가를 하였다.

## 2.3 모형의 평가지표

HSPF 모형의 보정을 위해 2000년부터 2016년까지의 수문, 수질 실측자료를 이용하였다. 보정기간은 수문의 경우 2011년 ~ 2014년, 수질의 경우 2013년 ~ 2014년으로 이루어졌으며 유출량, BOD, T-N, T-P 순으로 일별로 진행하였다. 검증기간은 수문이 2004년 ~ 2007년까지이고 수질이 2015년 ~ 2016년으로 이루어졌다. 모형의 보정은 최적화기법과 시행착오법을 이용하는 방법이 있으며, 본 연구에서는 수문보정기법인 시행착오방법을 이용하여 수문 모의결과를 보정 및 검증하였으며, 모형의 적합성과 상관성을 평가하기 위한 목적함수로는 평균계급근오차(RMSE), Percent BIAS (PBIAS), 상대평균절대오차(RMAE)를 사용하였고, 각각의 함수의 식은 다음과 같다. Q<sub>0</sub>은 실측치, Q<sub>s</sub>는 모의치, Q<sub>m</sub>은 실측치의 평균, Q<sub>ms</sub>는 모의치의 평균, n은 자료의 개수이며, RMSE는 0, RMAE는 0, NSE는 1, PBIAS는 작을수록 오차가 없다는 것을 나타낸다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_s(i) - Q_0(i)]^2} \quad (1)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i - Q_s}{\sum_{i=1}^n Q_i} \times 100 \quad (2)$$

$$RMAE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_s(i) - Q_0(i)|}{Q_m} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Q_0(i) - Q_s(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Q_0(i) - Q_m(i)]^2} \quad (4)$$

## 3. Results and Discussion

### 3.1 발생부하량, 배출부하량 산정

전국오염원 조사 자료를 기준으로 오염원을 생활계, 축산계, 산업계, 토지계, 양식계, 매립계로 구분하여 12개 소유역별로 발생부하량과 배출부하량을 산정하였다. 생활계는 주민

Table 1. Generated load by pollutant source for the study watershed

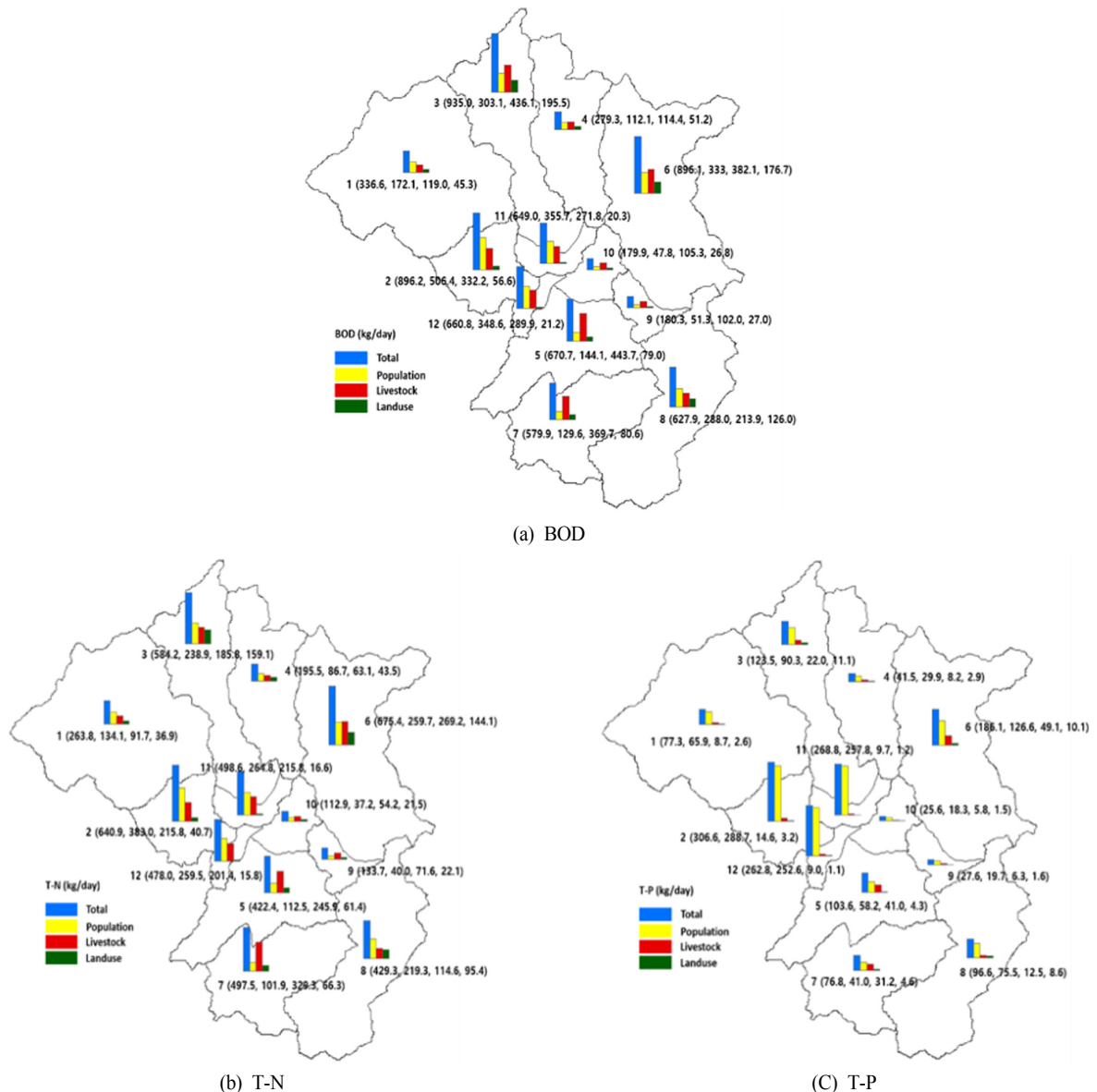
Pollutant source	Generated load (kg/day)		
	BOD	T-N	T-P
Population	8,278	2,331	287
Livestock	42,869	9,565	3,421
Industry	3,421	239	28
Landuse	4,106	3,167	243
Fish farm	412	82	22
Landfill	457	-	9
Total	59,542	15,384	4,010

**Table 2.** Discharge load by pollutant source for the study watershed

Pollutant source	Discharge load (kg/day)		
	BOD	T-N	T-P
Population	2,791.8	2,137.6	1,344.5
Livestock	<b>3,180.1</b>	<b>2,058.4</b>	<b>218.1</b>
Industry	13.6	12.8	1.4
Landuse	906.2	723.4	52.8
Total	6,891.7	4,932.2	1,616.8
Livestock percentage (%)	46.1	41.7	13.5

**Table 3.** Livestock discharge load of point and nonpoint source

	Livestock (kg/day)			Ratio (%)
	BOD	T-N	T-P	
Point source	2,480.5	1,790.8	191.9	81.7
Nonpoint source	699.6	267.5	26.1	18.3
Total	3,180.1	2,058.4	218.1	100.0



**Fig. 2.** The comparison of nonpoint discharge load by pollutant source of BOD, T-N, and T-P for each subwatershed.

등록상의 인구수, 축산계는 한우, 젖소, 돼지 기타(말, 사슴, 산양, 가금, 개) 가축의 사육 두수, 산업계는 산업폐수발생량, 토지계는 5개의 지목(전, 답, 임야, 대지, 기타)의 면적, 양식계는 양식장 시설면적, 매립계는 매립장 침출수 발생량을 기준으로 발생부하량과 배출부하량을 산정하였다.

발생부하량 산정 결과 BOD는 59,542 kg/day, T-N은 15,384 kg/day, T-P는 4,010 kg/day로 산정되었으며, Table 1은 대상 지역의 오염원별 발생부하량을 나타내고 있다.

배출부하량은 점오염원과 비점오염원으로 나눌 수 있으며 전국오염원 조사 자료에서 점오염, 비점오염을 구분하여 제공하고 있다. Table 2는 오염원별 배출부하량을 나타내고 있다. 배출부하량 산정결과 BOD는 6,891.7 kg/day, T-N은 4,932.2 kg/day, T-P는 1,616.8 kg/day로 산정되었다. 축산계의 배출부하량은 BOD가 3,180.1 kg/day로 전체의 46.1%를 차지하며, T-N은 2058.4 kg/day로 41.7%를 차지하고 있으며 T-P에서는 218.1 kg/day로 13.5%를 차지하는 것으로 조사되었다.

Table 3은 축산계 배출부하량의 점오염, 비점오염 비율을

나타내는 표로 축산계 비점오염 배출부하량은 BOD가 699.6 kg/day, T-N이 267.5 kg/day, T-P는 26.1 kg/day로 축산계의 점오염과 비점오염 배출부하량의 비율은 81.7%, 18.3%로 산정되었다. 합천댐 지역의 전체 배출부하량과 모델에 적용할 축산계 비점오염 배출부하량의 비율을 산정한 결과, 축산계 비점오염부하량은 전체 배출부하량 대비 BOD는 10.1%를 차지하며 T-N은 5.4%, T-P는 1.6%를 차지한다. Fig. 2는 오염원별 비점오염 배출부하량을 소구역별로 보여주고 있다.

### 3.2 유달부하량

유달부하량은 배출부하량이 지천을 통하여 대상 유역까지 유입되는 과정에서 자정되어 감소되는데, 이때 대상지점까지 도달한 부하량을 말하며, 유달부하량과 배출부하량의 비율을 유달률이라 한다. 본 논문에서의 유달부하량과 유달률의 산정방법은 실측기반에 의한 산정방법으로 수립년도 기준으로 산출된 월평균 배출부하량과 해당 시기의 대상유역의 수질 실측자료의 곱으로 산정하였다. Table 4는 합천댐 지역의 월

**Table 4.** Monthly delivery pollutant load and delivery ratio of the study watershed

Month	BOD		T-N		T-P	
	Delivery pollutant load (kg/day)	Delivery ratio	Delivery pollutant load (kg/day)	Delivery ratio	Delivery pollutant load (kg/day)	Delivery ratio
1	189.8	0.03	785.1	0.16	19.9	0.01
2	421.7	0.06	905.3	0.18	22.3	0.01
3	702.2	0.10	1,557.4	0.32	21.8	0.01
4	1,418.3	0.21	1,983.2	0.40	27.2	0.02
5	717.3	0.10	1,041.4	0.21	23.3	0.01
6	573.2	0.08	560.5	0.11	18.6	0.01
7	2,368.2	0.34	3,406.5	0.49	93.9	0.06
8	252.4	0.04	397.8	0.08	19.6	0.01
9	2,961.3	0.43	1,543.2	0.31	113.2	0.07
10	952.6	0.14	1,578.9	0.32	52.5	0.03
11	300.8	0.04	1,490.0	0.30	18.5	0.01
12	785.1	0.11	979.5	0.20	24.9	0.02

**Table 5.** Monthly nonpoint source delivery pollutant load of population and livestock for the study watershed

Month	BOD(kg/month)		T-N(kg/month)		T-P(kg/month)	
	Population	Livestock	Population	Livestock	Population	Livestock
1	241.1	578.0	657.1	1,277.4	4.6	9.6
2	535.6	1,284.1	757.7	1,473.0	5.2	10.8
3	891.9	2,138.5	1,303.5	2,534.0	5.1	10.6
4	1,801.5	4,319.2	1,659.9	3,226.9	6.3	13.2
5	911.1	2,184.4	871.6	1,694.3	5.4	11.3
6	728.1	1,745.7	469.1	912.0	4.3	9.0
7	3,008.1	7,212.0	2,014.1	3,915.5	21.8	45.5
8	320.6	768.7	332.9	647.2	4.5	9.5
9	3,761.5	9,018.4	1,291.6	2,510.9	26.3	54.8
10	1,210.0	2,901.1	1,321.5	2,569.0	12.2	25.4
11	382.1	916.1	1,247.1	2,424.3	4.3	9.0
12	997.2	2,390.8	819.8	1,593.7	5.8	12.1

별 유달부하량과 유달률을 나타내고 있으며 Table 5는 오염원의 입력을 위해 HSPF에 적용한 생활계와 축산계의 비점오염 유달부하량을 월별로 나타냈다.

**3.3 수질오염부하량의 모델 적용**

점오염원은 합천댐 유역에 위치하는 하수처리장 3개소와 축산분뇨처리장, 폐수종말처리장, 분뇨처리장을 월별 발생유량과 BOD, T-N, T-P의 농도를 평균하여 점오염원으로 적용하였다. 비점오염은 산정된 월별 유달부하량을 강우시 강우유출비의 영향을 크게 받는 것을 고려하여 강우가 발생하였을 때 강수량에 따라 차등 배분하고 강우가 발생하지 않은 날은 비점오염 유달부하량이 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 유달부하량은 산정하는 과정에서 kg/day 단위를 가지는데 유량을 이용하여 mg/L 단위로 환산하고 WDM 파일형태로 변환시켜 UCI (User's Control Input) 파일을 통해 비점오염 수질자료를 HSPF에 입력하였다.

**3.4 매개변수 보정 결과**

HSPF에서 유량에 관한 매개변수의 민감도 분석을 수행할

경우, LZSN, INFILT, KVARY, DEEPER, UZSN, NSUR, INTFW, IRC 등이 결과에 큰 영향을 미치는 것을 알 수가 있다. 본 연구에서 사용한 수문 매개변수의 값의 범위를 Table 6에 나타냈다. 수문 매개변수의 값의 범위는 HSPF Technical Note 6 (U. S. EPA, 2000)에서 제시한 보정 인자와 범위를 참고하였다. Table 7은 수질 매개변수의 적용범위를 나타낸 것으로 민감도 분석 결과 큰 영향을 주는 것으로 판단된 BOD는 OXRX 모듈의 KBOD, KODSET, REAK, BRBOD, T-N과 T-P는 NUTRX 모듈의 KDNI, CVBPN, KPLNM (지표, 상부, 하부), PLANK 모듈의 KIMP, KMP, BRPO4, ANAER를 중심으로 매개변수를 보정하였다.

**3.5 수문 보정 및 검증**

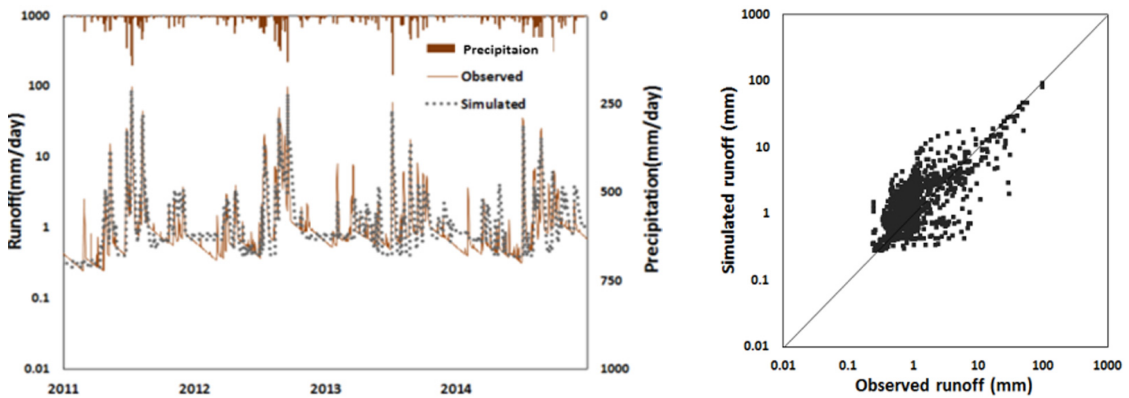
보정기간에 대한 실측자료와 모의 자료를 비교한 결과 합천댐 유역의 실측 연평균 유출고는 744.6 mm, 모의 유출고는 712.3 mm로 나타나 -4.6%오차를 나타내었고 R<sup>2</sup>는 0.83, RMSE는 2.565 mm/day, RMAE는 0.46 mm/day, NSE는 0.8로 나타났으며 매우 좋음 수준의 모형효율을 나타냈다. Fig. 3은 실측유출량과 모의유출량의 일별그래프를 나타내고 있으

**Table 6.** Calibration value of HSPF hydrology parameters in the Hapcheon dam watershed

Parameter	Unit	Initial value	Landcover	Calibration result
LZSN	inches	4.0 ~ 6.5	Forest	5.0
			Agriculture	2.0
			Etc.	2.0-5.0
UZSN	inches	1.12	Forest	0.5
			Agriculture	0.05
			Etc.	0.05-0.5
NSUR	none	0.2	Forest	0.2
			Agriculture	0.2
			Etc.	0.2
INTFW	none	0.75	Forest	0.5
			Agriculture	0.01
			Etc.	0.01-0.5
IRC	none	0.5	Forest	0.5
			Agriculture	0.5
			Etc.	0.5
INFILT	in/hr	0.16	Forest	0.01
			Agriculture	0.01
			Etc.	0.01-0.1
AGWRC	none	0.98	Forest	0.999
			Agriculture	0.999
			Etc.	0.98-0.999
DEEPER	none	0.1	Forest	0.1
			Agriculture	0.45
			Etc.	0.1-0.5
BASETP	none	0.02	Forest	0.0
			Agriculture	0.02
			Etc.	0.0-0.02

**Table 7.** HSPF water quality parameter range of values and calibrated values

Parameter	Unit	Definition	Range	Calibration result
KBOD20	1/hr	Unit BOD decay rate at 20°C	1.0E <sup>30</sup> ~ none	0.1 ~ 10
KODSET	ft/hr	BOD setting rate	0.0 ~ none	7.5 ~ 8.54
REAK	1/hr	Empirical constant in the equation used to calculate the reaeration coefficient	1.0E <sup>30</sup> ~ none	0.1 ~ 2.0
KDNI	(1/day)	Denitrification of NO <sup>3</sup>	0.0 ~ none	2.0 ~ 10.0
CVBPN	moles /mol	Conversion from biomass expressed as phosphorus to nitrogen	10.0 ~ 50.0	16.0
KPLNM	(/day)	Plant uptake parameters for surface layer	0.0 ~ none	0.1 ~ 0.5
KPLNM	(/day)	Plant uptake parameters for upper layer	0.0 ~ none	0.1 ~ 0.5
KPLNM	(/day)	Plant uptake parameters for lower layer	0.0 ~ none	0.1 ~ 0.5
KIMP	(/day)	Phosphate immobilization	0.0 ~ none	0.0 ~ 10.0
KMP	(/day)	Organic P mineralization	0.0 ~ none	0.004 ~ 0.04
BRPO4(1)	mg/m <sup>2</sup> .hr	Bental release rates of ortho - phosphorus under aerobic and anaerobic conditions, respectively	0.0 ~ none	0.005 ~ 1.0
BRPO4(2)	mg/m <sup>2</sup> .hr	Bental release rates of ortho - phosphorus under aerobic and anaerobic conditions, respectively	0.0 ~ none	0.004 ~ 1.0
ANAER	mg/L	Concentration of dissolved oxygen below which anaerobic conditions are assumed to exist.	0.0001 ~ 1.0	0.001 ~ 0.05



**Fig. 3.** Comparison between observed and simulated daily runoff for validation period.

며, 유출 검증결과를 나타내고 있다.

검정기간에 대한 실측자료와 모의 자료를 비교한 결과 실측 연평균 유출고는 772.2 mm이며, 모의 유출고는 804.0 mm로 +3.9%의 오차를 나타내었다. 모형 적합성 평가 결과 R<sup>2</sup>의 경우 0.78, RMSE는 2.76 mm/day, RMAE는 0.48 mm/day, NSE는 0.81로 나타났으며 검정 또한 좋음 수준의 모형효율을 나타냈다. 산정된 유출량을 이용하여 합천댐 유입구를 출구로 하는 하천의 유출량을 합하여 모의한 유입량과 실측 유

입량을 비교한 결과 모의된 연평균 유입량은 700.2 mm이며 유입률은 50.9%로 실측값에 비해 -0.9%의 오차를 가졌다. Fig. 4는 실측유출량과 모의유출량의 일별그래프를 나타내고 있으며, 유출 검증결과를 나타내고 있으며 Table 8, 9는 수문 보정 및 검정 결과이다.

**3.6 수질 보정 및 검정**

모형의 보정을 2013년 ~ 2014년, 검정을 2015년 ~ 2016년

**Table 8.** Observed and simulated annual mean runoff and model performance results for calibration period

Year	Precipitation (mm)	Observed		Simulated		R <sup>2</sup>	RMSE (mm/day)	RMAE (mm/day)	NSE
		Runoff (mm)	Runoff rate (%)	Runoff (mm)	Runoff rate (%)				
2011	1,321	817.4	61.9	807.5	61.1	0.91	1.76	0.31	0.94
2012	1,538	990.9	64.4	817.6	53.2	0.72	4.29	0.54	0.69
2013	1,085	622.4	57.4	604.8	55.7	0.85	1.32	0.35	0.90
2014	1,242	547.7	44.1	619.2	49.9	0.77	1.64	0.44	0.77
Mean	1,297	744.6	56.9	712.3	55.0	0.83	2.55	0.46	0.82



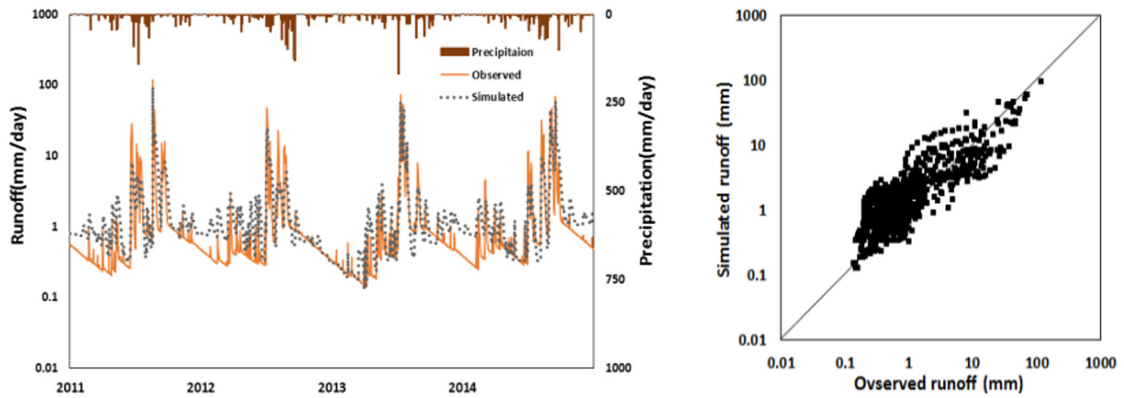


Fig. 4. Comparison between observed and simulated daily runoff for validation period.

Table 9. Observed and simulated annual mean runoff and model performance results for the validation period

Year	Precipitation (mm)	Observed		Simulated		R <sup>2</sup>	RMSE (mm/day)	RMAE (mm/day)	NSE
		Runoff (mm)	Runoff rate (%)	Runoff (mm)	Runoff rate (%)				
2004	1,547	868.7	56.2	871.0	56.3	0.84	2.66	0.13	0.89
2005	1,244	556.1	44.7	599.6	48.2	0.77	2.19	0.63	0.75
2006	1,411	747.4	53.0	770.5	54.6	0.67	3.27	0.65	0.78
2007	1,729	916.4	53.0	974.9	56.4	0.83	2.9	0.49	0.83
Mean	1,482	772.2	51.7	804.0	53.9	0.78	2.76	0.48	0.81

으로 설정하여 합천댐 유역의 실측 수질 농도값과 모의값, 보정결과에 따른 적합성 평가 결과는 Table 10과 같다. BOD의 모형 적합성 평가결과 보정기간의 RMSE는 1.03 mg/L, RMAE 0.51 mg/L, PBIAS - 11.8%로 나타났으며, 검정기간의 RMSE는 0.77 mg/L, RMAE 0.40 mg/L, PBIAS - 19.8%로 나타났다. T-N은 보정기간의 RMSE는 0.92 mg/L, RMAE 0.58 mg/L, PBIAS 24.6%로 나타났으며, 검정기간의 RMSE는 0.77 mg/L, RMAE 0.52 mg/L, PBIAS 17.9%로 나타났다. T-P의 보정기간의 RMSE는 0.081 mg/L, RMAE 0.82

mg/L, PBIAS - 15.4%로 나타났으며, 검정기간의 RMSE는 0.035 mg/L, RMAE 0.37 mg/L, PBIAS - 22.8%로 나타났다. Fig. 5는 비점오염원 중 생활계와 축산계 오염원을 적용시켰을 때의 BOD, T-N, T-P의 수질 양상을 나타낸다.

### 3.7 축산계 비점오염원 저감 시나리오 설정

본 연구에서 산정한 비점오염 유달부하량 중 축산계를 선정하여 20% (Scenario 1), 40% (Scenario 2)저감하여 모형을 구현하였다. Table 11은 축산계 비점오염부하량의 저감시

Table 10. BOD, T-N and T-P results for the calibration and validation periods

		Year	Observed (mg/L)	Simulated (mg/L)	RMSE (mg/L)	RMAE (mg/L)	PBIAS (%)
BOD	Calibration	2013	1.39	1.83	1.03	0.51	-11.8
		2014	1.48	1.64			
	Validation	2015	1.50	1.63	0.77	0.40	-19.8
		2016	1.43	1.61			
T-N	Calibration	2013	2.61	1.96	0.92	0.58	24.6
		2014	2.89	2.15			
	Validation	2015	2.41	1.97	0.77	0.52	17.9
		2016	2.69	1.85			
T-P	Calibration	2013	0.061	0.078	0.081	0.82	-15.4
		2014	0.068	0.088			
	Validation	2015	0.038	0.076	0.035	0.37	-22.8
		2016	0.041	0.072			



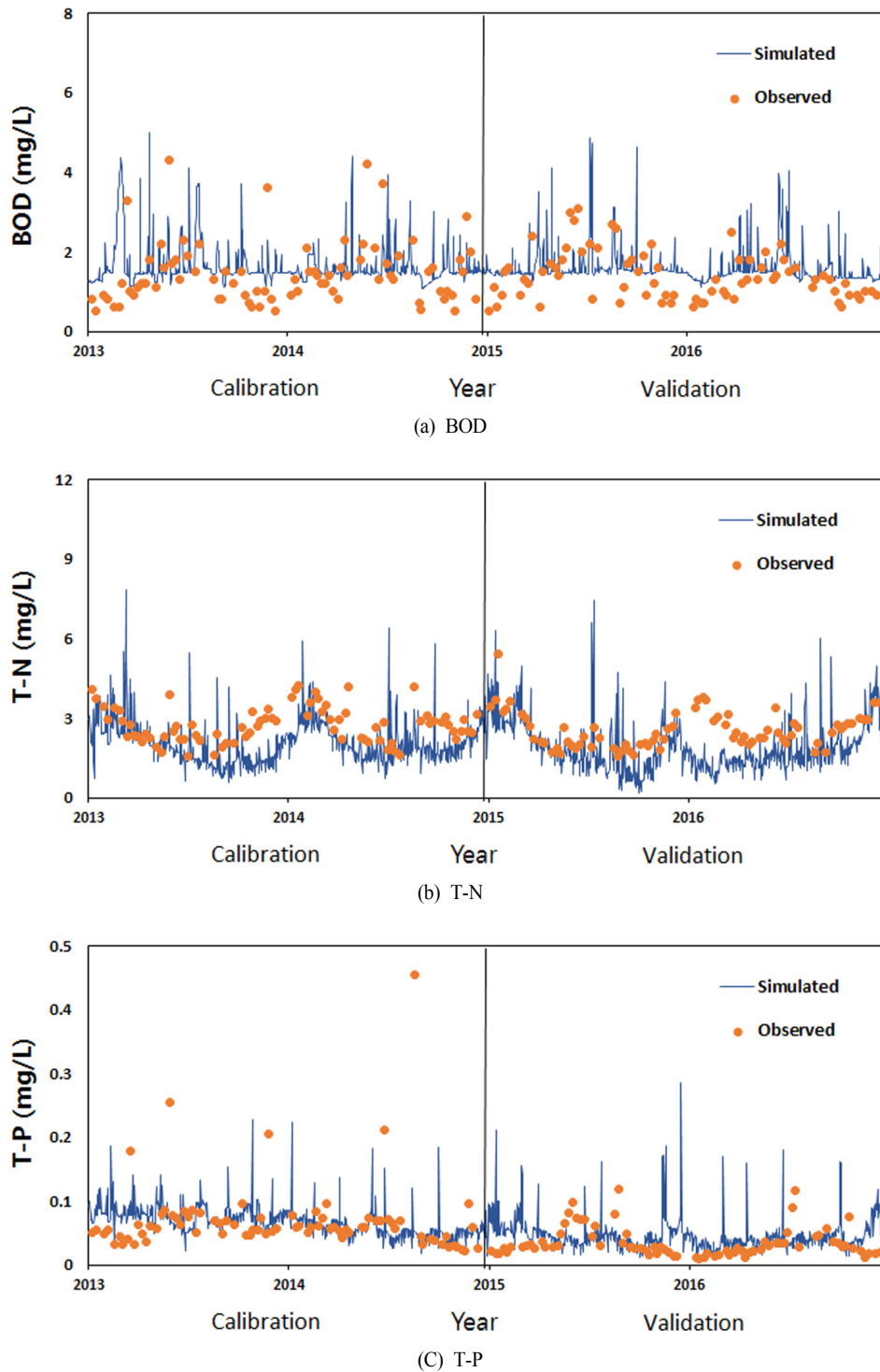


Fig. 5. The comparison between observed and simulated point and nonpoint source (population and livestock) for BOD, T-N, T-P calibration and validation period.

나리오 적용 전후에 대한 BOD, T-N, T-P의 시나리오 연도별 평균 농도를 보여주고 있다. 축산계 비점오염원 저감시나리오를 적용해 본 결과 BOD의 시나리오 적용전 평균값이 1.39 mg/L, 시나리오 1을 적용하였을 때 1.37 mg/L, 시나리오 2를 적용하였을 때 1.32 mg/L로 시나리오 1, 2를 적용하면 각각 2%, 5%의 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. T-N의 경우 시나리오 적용 전 평균값이 2.21 mg/L, 시나리오 1

을 적용하였을 때 2.18 mg/L, 시나리오 2를 적용하였을 때 2.14 mg/L로 시나리오 1, 2를 적용하면 각각 2%, 3%의 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. T-P는 시나리오 적용 전 평균값이 0.064 mg/L, 시나리오 1을 적용하였을 때 0.062 mg/L, 시나리오 2를 적용하였을 때 0.060 mg/L로 시나리오 1, 2를 적용하면 각각 2%, 6%의 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

**Table 11.** The comparison of water quality between before and after applying the livestock reduction scenarios

Year	BOD (mg/L)			T-N (mg/L)			T-P (mg/L)		
	Before Scenario	Scenario 1	Scenario 2	Before Scenario	Scenario 1	Scenario 2	Before Scenario	Scenario 1	Scenario 2
2000	1.29	1.28	1.25	2.81	2.78	2.76	0.052	0.050	0.048
2001	1.36	1.31	1.26	2.01	1.98	1.95	0.081	0.080	0.072
2002	1.31	1.29	1.23	2.02	1.90	1.88	0.070	0.070	0.063
2003	1.10	1.09	1.06	2.57	2.51	2.44	0.076	0.077	0.075
2004	1.21	1.20	1.16	2.31	2.3	2.25	0.054	0.053	0.051
2005	1.35	1.31	1.26	1.84	1.81	1.78	0.046	0.043	0.040
2006	1.33	1.31	1.24	2.68	2.67	2.64	0.079	0.076	0.071
2007	1.58	1.55	1.46	2.59	2.55	2.51	0.053	0.047	0.045
2008	1.26	1.23	1.19	2.43	2.41	2.37	0.064	0.059	0.056
2009	1.14	1.13	1.09	2.06	1.98	1.97	0.095	0.094	0.091
2010	1.26	1.25	1.18	1.91	1.88	1.81	0.070	0.067	0.066
2011	1.21	1.18	1.14	2.02	1.97	1.92	0.064	0.056	0.050
2012	1.63	1.62	1.56	2.85	2.83	2.78	0.049	0.046	0.043
2013	1.80	1.78	1.69	1.84	1.83	1.81	0.067	0.066	0.061
2014	1.62	1.61	1.56	2.04	2.02	1.98	0.057	0.055	0.053
2015	1.61	1.56	1.51	1.86	1.82	1.81	0.062	0.058	0.052
2016	1.61	1.59	1.56	1.78	1.77	1.75	0.051	0.050	0.046
Mean	1.39	1.37	1.32	2.21	2.18	2.14	0.064	0.062	0.060

#### 4. Conclusion

본 연구에서는 합천댐 유역을 대상으로 HSPF 모형을 사용하여 유출량, 유출률 및 수질특성을 분석하였다. 비점오염원을 생활계, 축산계, 산업계, 토지계로 구분하여 산정하였고 HSPF 모형에 적용하여 비점오염원의 영향을 분석하였다. 그 중 비점오염원의 비중이 증가하는 추세인 축산계의 배출부하량 저감을 위한 저감대책시나리오를 수립하여 시나리오별 수질개선 효과를 분석하였다.

HSPF모형의 입력 자료로는 합천댐 유역의 유역도, 하천도, 수치지도, 토지이용도를 구축하였다. 기상자료는 거창기상관측소의 2000년 ~ 2016년까지 강수량, 최고기온, 최저기온, 평균풍속 등의 자료를 수집하였고 WDMutil의 기능을 이용하여 일 평균 이슬점온도, 일사량을 생성하였다. 수질자료는 환경부에서 제공하는 수계오염 총량관리기술 지침을 기초로 각 소유역 별 생활계, 산업계, 축산계, 매립계, 양식계에 대해 발생부하량과 배출부하량을 산정하였으며 발생부하량 산정 결과 BOD는 59,542 kg/day, T-N은 15,384 kg/day, T-P는 4,010 kg/day로 산정되었으며, 배출부하량은 BOD는 6,891.7 kg/day, T-N은 4,932.2 kg/day, T-P는 1,616.8 kg/day로 산정되었다. 모델에 적용할 축산계 비점오염 배출부하량을 산정한 결과 전체 배출부하량에 비해 BOD는 10.1%를 차지하며 T-N은 5.4%, T-P는 1.6%를 차지하였으며 산정된 축산계 비점오염 배출부하량에 강우강도와 유달률을 적용시켜 월별 비점오염 유달부하량을 산정하여 모델에 적용하였다.

수문, 수질의 적용성을 평가하기 위해 수문의 보정기간은 2011년 ~ 2014년, 검정기간은 2004년 ~ 2007년으로 설정하

였고 수질의 보정기간은 2013년 ~ 2014년, 검정기간은 2015년 ~ 2016년으로 설정하였다. 보정기간과 검정기간을 나누어 실측치와 모의치를 비교하였으며, RMSE, NSE, RMAE 등을 이용하여 적합성 검증이 이루어졌다.

합천댐의 유출량을 산정한 결과 보정기간 (2011년 ~ 2014년)에 대한 실측 연평균 유출고는 744.6 mm이며, 모의 유출고는 712.3 mm로 -4.6%의 오차를 나타내었고 적용성 평가 결과는 R<sup>2</sup>의 경우 0.83, RMSE는 2.55 mm/day, RMAE 0.46 mm/day, NSE 0.82로 나타났으며, 검정기간 (2004년 ~ 2007년)에 대한 실측 연평균 유출고는 772.2 mm이며, 모의 유출고는 804.0 mm로 +3.9%의 오차를 나타내었으며 적합성 평가 결과는 R<sup>2</sup>의 경우 0.78, RMSE 2.76 mm/day, RMAE 0.48 mm/day, NSE 0.81로 나타났다.

합천댐의 수질모델링 결과 점오염원과 비점오염원 자료를 산정하여 적용시킨 BOD의 보정기간, 검정기간의 RMSE는 1.03, 0.77 mg/L, RMAE는 0.51, 0.40 mg/L, PBIAS는 -11.8, -19.8%로 나타났다. T-N의 경우 RMSE는 0.92, 0.77 mg/L, RMAE는 0.58, 0.52 mg/L, PBIAS는 24.6, 17.9%로 나타났으며, T-P는 RMSE는 0.081, 0.035 mg/L, RMAE는 0.82, 0.37 mg/L, PBIAS는 -15.4, -22.8%로 나타났다.

수질 개선효과를 위해 축산계의 비점오염원 배출량 저감 시나리오를 생성하여 HSPF 모형에 적용시켰으며 시나리오 1은 20%저감, 시나리오 2는 40%를 저감하였다. BOD에 축산계 비점오염원 저감시나리오를 적용해 본 결과 시나리오 적용 전 평균값이 1.39 mg/L, 시나리오 1을 적용하였을 때 1.37 mg/L, 시나리오 2를 적용하였을 때 1.32 mg/L로 시나리오 1, 2에서 각각 2%, 5%의 저감효과를 보였으며, T-N의

경우 시나리오 적용 전 평균값이 2.21 mg/L, 시나리오 1을 적용하였을 때 2.18 mg/L, 시나리오 2를 적용하였을 때 2.14 mg/L로 각각 2%, 3%의 저감효과를 가졌다. T-P는 시나리오 적용 전 평균값이 0.064 mg/L, 시나리오 1을 적용하였을 때 0.062 mg/L, 시나리오 2를 적용하였을 때 0.060 mg/L로 3%, 6%의 저감효과를 보였다.

본 연구에서 합천댐 유역의 수문과 수질을 모형효율을 평가한 결과 수문은 좋음 수준을 가졌으며, 수질은 적용성 평가가 매우 우수하지는 않지만 시나리오 적용으로 수질개선 효과가 있음을 입증하였다. 그리고 지속적인 모니터링을 기반으로 모델의 신뢰도 향상이 필요한 것으로 판단되며 추후 제공되는 전국오염원조사자료를 이용하여 신뢰성 있는 비점 오염원 배출량 도출이 가능할 것으로 판단된다. 비점오염원의 효과적인 관리를 위해서는 축산비점오염원의 저감 대책이 필요하며 이러한 연구결과는 비점오염연구 및 유역수질 관리에 크게 기여할 것으로 기대된다.

### Acknowledgement

본 연구는 한국연구재단 이공학개인지초연구지원사업 연구비지원(과제번호 2018-0868)에 의해 수행되었습니다.

### References

- Cho, S. J. (2015). *Analysis of the impact of non-point pollutant from livestock farming on river water quality using HSPF model*, Master's, Thesis, Kunkok University, 1-22. [Korean Literature]
- Han River Flood Control Office (HRFCO). (2018). *Water Resources Management Information System (WAMIS)*, [http://www.wamis.go.kr/wkw/wl\\_dubwlobs.aspx](http://www.wamis.go.kr/wkw/wl_dubwlobs.aspx) (accessed Oct. 2018).
- Hwang, D. J., Lee, H. J., Shin, C. K., Seo, J. G., Lim, T. H., Jung, J. H., Yoon, Y. S., Kim, M. S., Huh, S. N., You, J. J., Kwan, Y. H., Park, S. H., and Kwan, H. K. (2005). *Effect of turbid water on the water quality of Imha-reservoir and Nakdong river*, Nakdong River Environment Research Center National Institute of Environmental Reserch, 1-28. [Korean Literature]
- Jeon, J. H., Jang, T. G., Hwang, H. S., Choi, D. H., Kim, T. D. (2010). Characterization of nonpoint source pollutant loads from the Nakdong river basin using unit load method, *Journal of Korean Society Urban Environment*, 10(3), 203-211. [Korean Literature]
- Kim, B. R. and Kang, B. S. (2013). Parameter sensitivity analysis for spatial and temporal temperature simulation in the Hapcheon dam reservoir, *Journal of Korean Water Resource Association*, 46(12), 1181-1191. [Korean Literature]
- Lee, S. I., Shin, M. H., Jeon, J. H., Park, B. K., Lee, J. M., Won, C. H., and Choi, J. D. (2015). Effect of NPS loadings from livestock on small watersheds, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 57(2), 27-36. [Korean Literature]
- Lee, Y. S., Lee, H. G., Hong, S. C., and Oh, D. M. (2009). Effect of non-point sources from livestock composted land -A case of cows Manure-, *Journal of Wetlands Research*, 11(3), 81-88. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2012). *Comprehensive measures for advancement of livestock manure management*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2018). *Water Environment Information System (WEIS), Korean Reach File (KRF)*. [http://water.nier.go.kr/publicFront/gisInfo/gisKrf.jsp?menuIdx=5\\_1\\_3](http://water.nier.go.kr/publicFront/gisInfo/gisKrf.jsp?menuIdx=5_1_3) (accessed Oct. 2018) .
- National Institute Environmental Research (NIER). (2008). *Guideline for second stage water pollution total volume management*, National Institute Environmental Research. [Korean Literature]
- National Institute Environmental Research (NIER). (2013). *A Study on Unit Load of Livestock Wastes for Expansion of the Target Indicator in the management of Total Maximum Daily Loads*, National Institute Environmental Research. [Korean Literature]
- Oa, S. W. (2018). Analysis on the runoff reduction efficiency of non point pollutants in animal feeding area using artificial reservoir, *Journal of Wetlands Research*, 20(4), 417-423. [Korean Literature]
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). (2000). *BASINS technical Note 6: Estimating hydrology and hydraulic parameters for HSPF*, EPA-823-R00-012, United States Environmental Protection Agency.
- Won, C. H., Shin, M. H., Choi, W. H., Shin, J. Y., Park, W. J., and Choi, J. D. (2011). Application of surface cover materials for reduction of soil erosion, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 27(5), 848-884. [Korean Literature]