



Original Article

## 유역모델을 이용한 자란만·사량도 해역의 육상기인 오염부하량 평가

이태환<sup>1</sup> · 조홍래<sup>2</sup> · 박성은<sup>3</sup> · 김영민<sup>4</sup> · 김청숙<sup>4</sup> · 김진호<sup>4,†</sup>

<sup>1</sup>주)하이드로코어 유역환경연구소 책임연구원

<sup>2</sup>주)하이드로코어 유역환경연구소 대표이사

<sup>3</sup>국립수산과학원 어장환경과 연구사

<sup>4</sup>국립수산과학원 어장환경과 연구원

## Estimation of Land-Based Pollution Loads to Jaranman·Saryang Island areas for export using a Watershed Model

Taehwan Lee<sup>1</sup>, Hong-Lae Cho<sup>2</sup>, Sung-Eun Park<sup>3</sup>, Youngmin Kim<sup>4</sup>, Chung-sook Kim<sup>4</sup>, and Jin Ho Kim<sup>4,†</sup>

<sup>1</sup>Research Scientist, Hydrocore Ltd. Watershed Environmental Research Institute, Seoul 08501, Korea

<sup>2</sup>CEO, Hydrocore Ltd. Watershed Environmental Research Institute, Seoul 08501, Korea

<sup>3</sup>Scientific Officer, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

<sup>4</sup>Scientific Researcher, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

### 요 약

본 연구는 자란만·사량도 해역의 수질에 영향을 주는 유역에 대해 STREAM 모델을 적용하여 해역으로 유입되는 부하량의 시공간적 특성 분석을 수행하였다. 육역으로부터 자란만·사량도 해역으로 유입되는 부하량의 오염원별 기여율 분석 결과 TOC, TN, TP 각각 점오염원이 차지하는 비중이 11.3%, 67.6%, 66.5%로 점오염원이 차지하는 비율이 큰 것으로 분석되었다. 연구유역 내 대표 하천을 대상으로 한 유입특성 분석결과 TOC, TN, TP 모두 유입량이 최대치인 하천은 대독천으로 분석되었는데 이는 하천 및 해당 하천의 유역규모가 크기 때문인 것으로 판단된다. 반면 단위면적당 유입량은 산양천 유역이 가장 큰 것으로 분석되었다. 이는 다른 유역에 비해 농지의 비율이 높기 때문인 것으로 판단된다. 또한 자란만 해역으로의 월별 유출특성을 살펴본 결과, 유출특성은 해당 월의 강우량과 건기일수에 따라 큰 변동폭을 보이는 것으로 분석되었다. 상기 연구결과는 자란만·사량도 해역의 어장관리 계획 수립 시 관리 대상, 지역, 시기선정에 있어 효율적인 의사결정에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** – In this study, STREAM model was applied to the Jaran Bay Watershed to estimate the pollution loads entering the shellfish growing areas and to analyze the characteristics of pollution loads. The result demonstrated a high contribution of point source pollution loads from the study area to the Jaran Bay. The point source pollution loads contributed to 11.3%, 67.6% and 66.5% of TOC, TN and TP, respectively. According to the spatial analysis, the highest discharged pollution loads were from Daedokcheon (River). This is due to its large watershed. The highest discharged pollution loads for grid cell were from Sanyangcheon (River). This is due to its rural land use. Monthly pollution loads were heavily influenced by seasonal variations.

**Keywords:** Pollution loads(오염부하량), Watershed model(유역모델), Management of coastal(연안관리), Jaranman(자란만), Saryang island(사량도)

### 1. 서 론

경남 고성군과 통영시에 걸쳐 위치하고 있는 자란만·사량도 해역은 1973~1974년 및 1983년 실시한 위생조사결과를 근거로 1984년 5월 9,492 ha의 수면적이 수출용 패류생산 지정해역(2호)으로

설정되어 관리되고 있다(Shim *et al.*[2009]). 자란만의 경우 5개의 하천이 만대로 영양염을 공급하여 일차생산자에게 유리한 환경이 조성되어 있으며 이로 인하여 굴 수확, 우렁챙이 등의 양식어장, 가두리 및 정치망어장 등을 이용한 양식산업이 활발하게 이루어지고 있다(Oh *et al.*[2015]). 공급되는 영양염은 정도에 따라 해역의 수질과 수생태에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 자란만·사량도 해역과

†Corresponding author: tool20@naver.com

접해 있는 자란만, 고성만, 통영유역은 하수처리장 등 점오염원과 도심지, 농경지 등 비점오염원이 위치하고 있고 도시화의 가속, 농업인력 고령화에 의한 비료 과다투입은 하천 및 해역으로 유입되는 비점오염 부하량의 증가를 초래할 수 있다. 자란만·사랑도 해역의 안정적인 패류생산을 위해서는 무엇보다 패류생산 해역의 수질과 수생태 관리가 요구되며 이에 따라 패류생산해역의 위생관리를 위해서는 인접 유역에서 유입되는 오염부하량 산정 및 유입 특성에 대한 평가가 필요하다. 유역 오염부하량의 유입 특성을 산정하기 위한 다양한 방법이 존재하지만 일반적으로 한정된 시간과 장소에서 이루어지는 유량과 수질 모니터링 결과는 오염부하의 시공간적 분포를 파악하는 데 한계가 있으며, 비점오염물질의 유출량 산정에 핵심이 될 수 있는 강우시 유량 및 수질 모니터링의 경우 작업여건이 힘들고 많은 경비와 인력이 필요하다(Lee *et al.*[2012]). 이러한 단점을 보완하기 위해 유역모델링 기법이 다양한 연구에 도입되고 있다. 대상유역에 유역모델을 적용하면 전체적 관점에서 유역의 수문과 수질 과정을 이해할 수 있으며, 환경변화에 따른 미래 상황을 예측할 수 있는 장점을 가진다. 국내·외에서 해역의 수질과 생태계 개선을 위해 대상유역에 모델링 기법을 적용한 다수의 연구사례가 보고되고 있다(Chen[2004]; Jeong *et al.*[2018]; Kim *et al.*[2015]; Liu *et al.*[2008]; NIER[2014]; Williams *et al.*[2006]). 유역 모델링을 통해 얻어지는 유입특성 평가와 오염원별 기여율 결과는 대상해역으로 유입하는 육상오염물질 부하량의 시공간적 변화를 분석하여 체계적인 유역 관리방안을 도출하거나, 강우 시 육상오염물질 유입에 따른 양식여장의 수산피해 대책 마련에도 활용될 수 있다. 본 연구에서는 유역모델을 이용하여 자란만·사랑도 해역으로 유입되는 오염부하량의 산정, 유입부하량의 오염원별 기여율 분석, 그리고 시간적, 공간적 유입 특성에 대한 평가를 수행하고 이를 통

해 자란만·사랑도 해역의 효과적인 관리 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구지역

본 연구의 연구 대상지역은 자란만·사랑도 수출용 패류생산 지정해역에 영향을 미치는 자란만·고성만 유역 및 자란만 해역에 접한 통영시 유역이다(Fig. 1). 지형자료 및 연구대상 지역 내 하천자료 등을 이용하여 연구대상이 되는 범위를 결정하고 면적을 분석한 결과 유역면적은 약 162 km<sup>2</sup> 인 것으로 분석되었다. 연구 대상 유역은 경상남도 고성군 및 통영시에 위치하였으며, 연구지역 내 행정구역은 통영시 산양읍, 도산면, 광도면, 고성군 삼산면, 하일면 등 총 12개의 읍, 면, 동으로 구성되어 있다. 해당지역의 통계자료를 기반으로 연구지역 내 인구수를 분석한 결과 연구지역 내 인구는 총 72,131명으로 분석되었다. 연구 대상유역은 토지피복 구성 중 산림이 66.08%로 가장 높은 비율을 차지하는 지역으로 불투수면의 비율이 높은 지역으로는 고성군 고성읍, 통영시 무전동, 북신동, 미수동 등이 있으며, 전체 연구유역에서 시가지·건조지역의 비율은 6.55%정도이다. 자란만 유역의 토성은 양토(Loam)와 미사질 양토(Sandy Loam)등 10개의 토성으로 구분되어 있으며 양토와 미사질 양토가 전체의 94.2%를 차지하는 것으로 분석되었다.

### 2.2 적용 모델의 개요

현재 국내에서 대표적으로 사용되는 모델로는 SWAT, HSPF, SWMM 등이 있다. 이들은 대부분 외국에서 개발된 준분포형 모델로 농심 농업유역이 다수 분포하며, 산지의 비율이 높고 토지이용이 집약적으로 이루어지는 국내 유역환경에 적용하기 위해서는 모

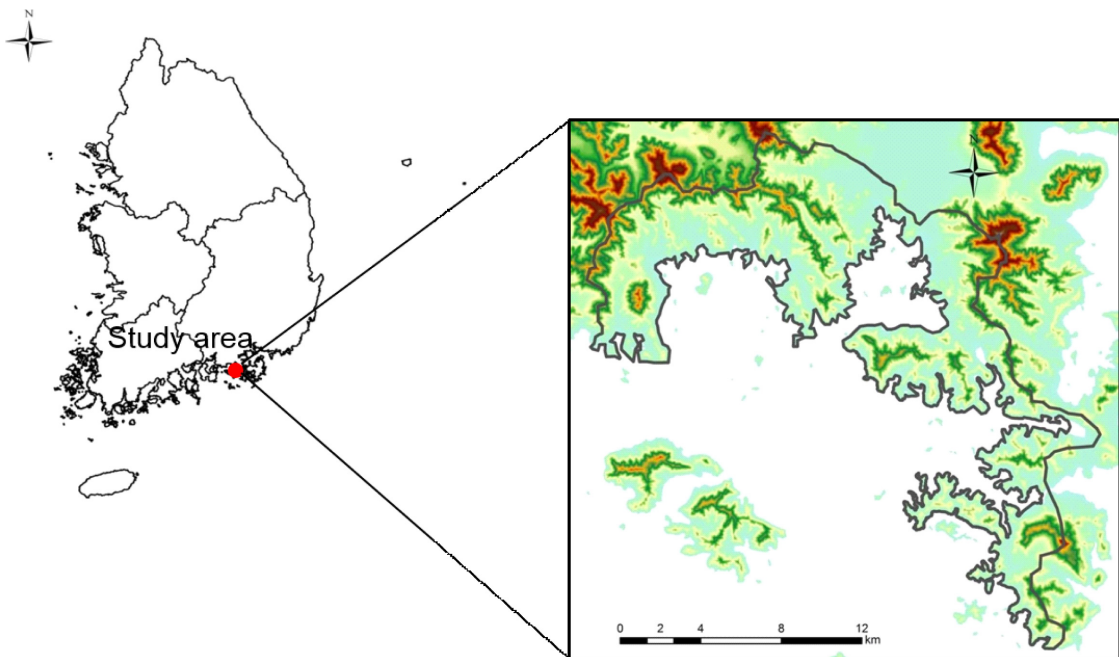


Fig. 1. Location and boundary of the study area.

델의 일부 기능을 개선하거나 새로운 기능을 추가해야 하는 한계가 있다(Jeon *et al.*[2007]; Sakaguchi *et al.*[2014]). 본 연구의 목적에 부합하는 모델의 요구조건으로는 통영·자란만 유역의 분할구조가 비균질적임을 고려할 때 유역을 동일 크기의 격자로 구분하는 격자형 유역모델이 적합할 것으로 판단되었으며, 수문/유사 모의방법으로는 현상이해와 시나리오 분석을 위해 물리식이 적용된 모델이 적합할 것으로 판단되었다. 또한 연구대상 유역에 분포하고 있는 농촌유역을 고려하여 농촌유역의 특성인 논·의 저류기능, 저수지, 보, 배수문 등 수리시설, 비료 투입량, 관개 등을 반영할 수 있는 모델이 적합할 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 상기조건을 만족시킬 수 있는 STREAM(Spatio-Temporal River-basin Eco-hydrology Analysis Model)모델을 선정하여 연구유역에 적용하였다.

STREAM의 유역 공간분할 구조는 Fig. 2와 같이 정의된다. 모의 대상 유역은 다수의 소유역으로 구분되며 소유역 사이의 상하류 위계관계는 노드-링크의 연결 구조로 표현된다. 소유역은 다시 일정 크기의 정방형 격자로 분할되며, 각 격자는 다시 지표면, 토양층, 대수층의 수직적 구조를 갖는다(Cho *et al.*[2015a]).

STREAM은 논/밭 독과 하천제방의 높이에 따라 지표수의 흐름을 제어하고 보, 저수지, 제수문, 관개수로 등의 수리구조물은 사용자가 입력한 제원에 따라 모델 내부에서 생성한다. 또한 토양/지표수층의 탄소 및 질소, 인 변환과정 및 이동을 모의한다. 유사 이동은 입도 크기에 따라 점토(clay), 미사(silt), 세립사(fine sand), 조립사(coarse sand)로 구분하고 이동형태에 따라 부유사(suspended load)와 소류사(bed load)로 구분한다. 논으로의 유입은 강수량과 관개량을 고려하며, 유출은 침투량, 증발산량 유출량을 고려한다. 논에서는 담수심 높이가 물꼬높이보다 높을 때 유출이 발생되며, 물꼬높이는

벼의 생육시기에 따라 사용자가 입력한 값을 사용한다. 또한, STREAM은 작물성장 시기에 따라 필요한 논·밭의 권장 담수심과 밭의 토양수분함량(soil water content)에 대한 최대값, 최소값을 설정하여 모델 내부에서 관개가 자동적으로 구현된다. 논·밭의 담수심과 밭의 토양수분함량이 시기별로 입력된 최소값보다 낮으면 관개를 시작하고, 논·밭의 물높이와 밭의 토양수분함량이 최대값보다 높으면 관개를 멈추게 된다. 유역모델 STREAM은 논·밭의 퇴비 또는 비료 투입에 따른 영양물질의 변환 및 이동 과정을 모의한다. 모델 내에 비료투입시기, 비료투입량, 용출속도상수(k)를 입력하며 프로세스는 용출, 식생섭취, 변환(분해/흡착 등), 이동(지표유출/침투)으로 구성된다. 유역모델 STREAM은 토양과 수체 내 탄소, 질소, 인을 모의하며 각각의 정의는 다음과 같다. 유기물은 POM, DOM, SedOM으로 구분하며 POM은 Litter, Residue, Biomass, Humus 등의 입자성 유기물을 DOM은 입자성 물질의 분해과정에서 생성되는 용존성 유기물을 SedOM은 용존성 물질이 토양 입자에 흡착된 형태의 유기물을 의미한다. 무기물은 DIM, PIM으로 구분하며 DIM은 용존성 유기물의 무기화과정에서 생성되는 용존성무기물을 PIM은 용존성 유기물이 토양 입자에 흡착된 형태의 무기물을 의미한다 유기물은 생분해성(Labile)과 난분해성(Refractory)으로 구분하며 지하대수층에는 용존성 물질만 존재하는 것으로 가정한다.

2.3 모델구축

연구대상 유역을 복수의 소유역으로 분할하였다. 유역 구분 시 하천의 흐름을 모의할 수 있도록 DEM 자료를 이용하여 경사도를 반영하였으며 하천도를 이용하여 하천의 위치를 반영하였다. 현장 답사를 통해 유역출구를 확인하고 DEM에 유역 출구를 반영하여 유역을 구분하였다. 고성군 시가지 지역의 배수구역은 고성군 하수

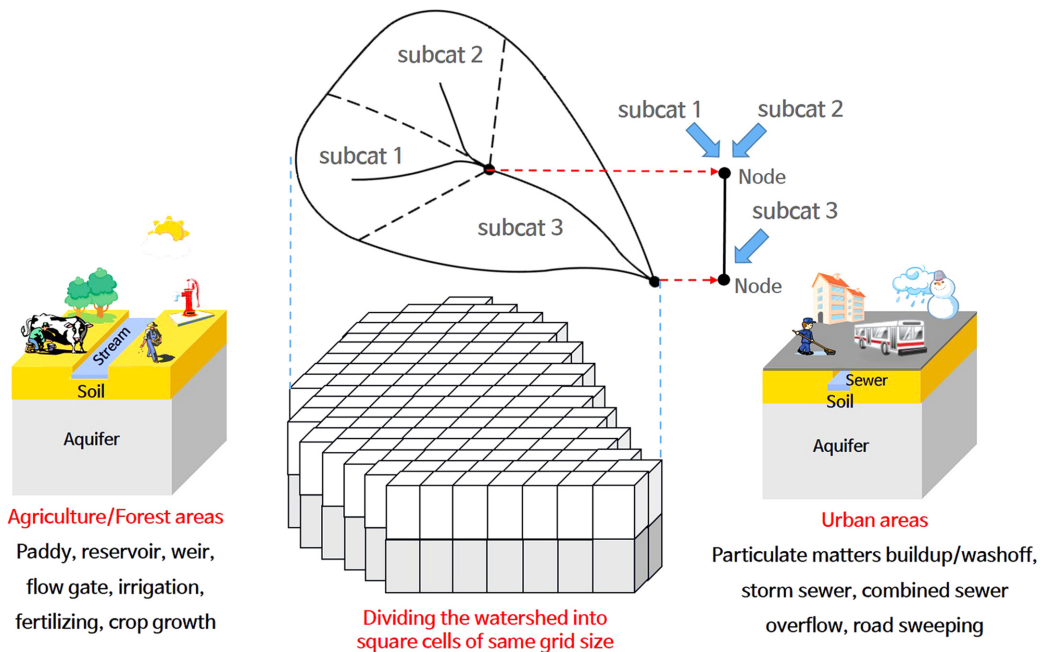


Fig. 2. Representation of a watershed using square grid cells and node-link structure in STREAM.



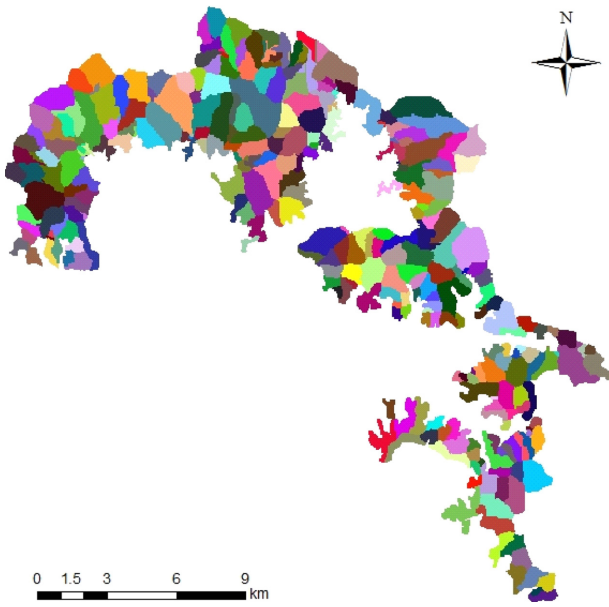


Fig. 3. Sub-watersheds of the study area.

도 정비 기본계획도의 FDA 지정해역유역을 반영하였다. 통영도심 지역의 경우 DEM 및 현장조사 외에 통영시청으로부터 관망자료를 협조받아 관망을 통한 물순환을 함께 포함하여 유역분할작업을 수행하였다. 구분된 소유역은 총 150개이며 구분된 각 소유역은 다시 세부유역으로 구분하였다. 전체 세부유역은 총 327개이다(Fig. 3).

공간 입력자료로는 지형, 토지이용, 식생, 토양, 지질, 하천형상 등 공간자료를 구축하였다. 수집된 환경자료에 대한 GIS 분석을 통해 환경자료별 50 m × 50 m 크기의 래스터(raster) 형식의 파일을 생성하고(Fig. 4) 이를 ASCII 형식으로 변환하여 공간 입력 자료를 입력하였다. 티센폴리곤 기법을 이용하여 강우/기상 관측소의 적용 범위를 설정하였다. 강우자료의 경우 1개 기상대와 3개 강우관측소의 강우자료를 이용하였으며 기상자료는 3개 기상대자의 자료를 이용하였다. 강우자료 중 기상대는 통영기상대이며 강우관측소는 사랑도, 삼천포, 고성 AWS 지점이다. 기상자료는 통영기상대, 진주기상대, 남해기상대의 자료를 이용하였으며, 기상항목은 1시간 단위의 기온, 상대습도, 현지기압, 풍속, 일사량 자료를 수집하여 분석하였다.

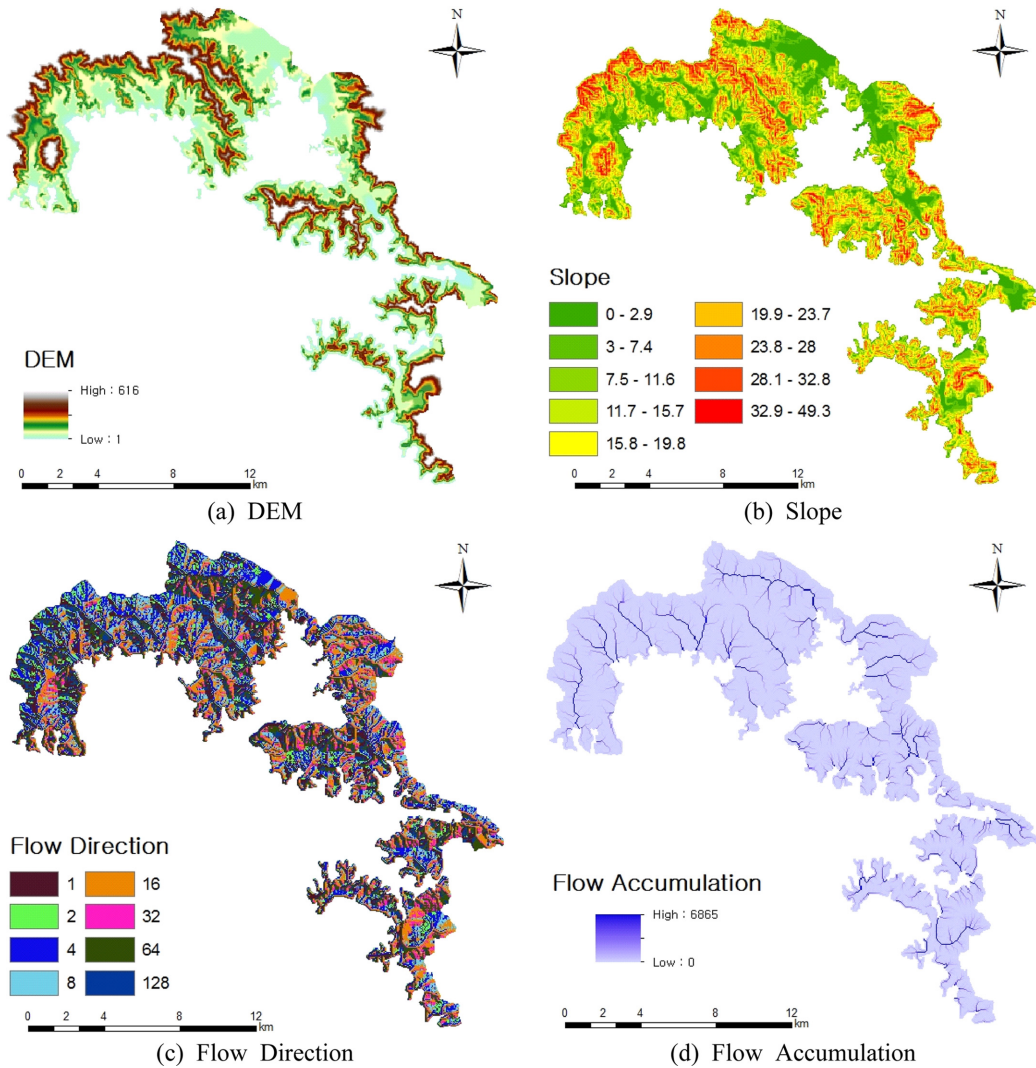


Fig. 4. Topographic analyses for the study area using 50 m × 50 m grid cells.

2.4 모델보검정

모델 보검정 대상으로 선정한 매개변수는 수문, 유사, 수질 그룹으로 구분할 수 있다. 수문관련 매개변수는 다시 적용되는 공간적 범위에 따라 토양, 하천, 지하수의 수문과정으로 구분된다(Cho *et al.*[2015b]). 토양에서의 수문과정에 영향을 미치는 인자로는 토양의 포화수리전도도  $K_{sat}$ , 대공극 발달계수  $MacFactor$ , 지표면의 조도계수  $InterrillMN$  등이 있다. 하천 유출과정과 관련된 매개변수로는 하천만수 시 유속 가중인자  $MCFactor$ , 하천의 조도계수  $StrMN$  등을 선정하여 보검정에 이용하였다. 지하수 유출과 관련해서는 대수층의 포화수리전도도  $AquK_{sat}$ , 대수층의 공극  $AquThetaS$ , 지하수 유출 감수계수  $K_{gw}$  등을 선정하였다. 영양물질 변환 및 이동과 관련해서는 탄소, 질소, 인의 저장과 변환, 유사의  $CNP$  흡착능력을 나타내는  $AdsCapacity$ , 물의 이동에 따른  $CNP$  이동 능력을 나타내는  $Q90_{surfP}$ ,  $Q90_{infl}$ ,  $Q90_{intf}$ ,  $Q90_{soaq}$ ,  $IAPores$  등의 매개변수를 선정하여 보검정에 이용하였다.

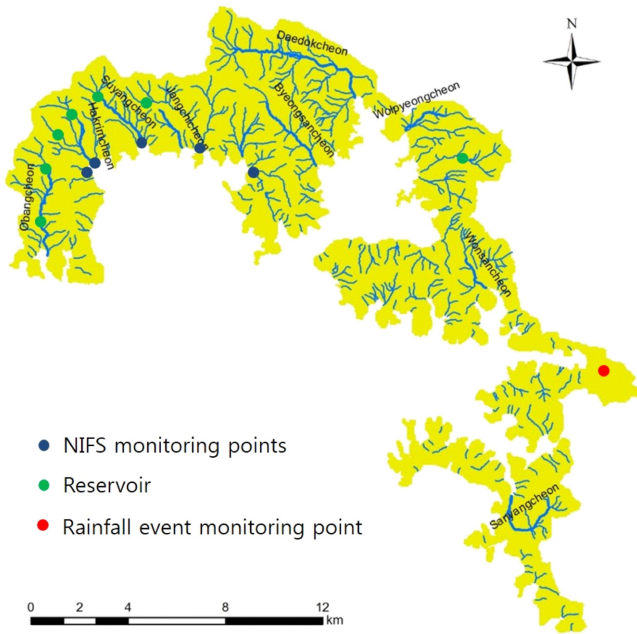


Fig. 5. Location of model calibration points.

모델 보검정은 3가지 형태의 자료를 이용하여 수행하였다(Fig. 5). 첫 번째로, 국립수산과학원에서 학림천, 수양천 등 자란만 내의 주요하천에서 월 1회 조사하는 지정해역 경계선 설정 부하량 조사자료를 이용하여 평수기 수질·유량의 보검정을 수행하였다. 두 번째로, 강우 시 도심지 비점오염원의 영향이 적지 않을 것으로 판단되어 2018년 8월과 9월 중 통영 도심지를 흐르는 수로에서 2회 강우기 현장조사를 통해 얻어진 자료를 이용하여 수질·유량의 보검정을 수행하였다. 마지막으로 모델의 물순환 내부 프로세스 확인을 위한 저수지 저수율에 대한 보검정도 함께 수행하였다. 저수율은 농어촌 공사의 저수지 저수율 자료를 이용하여 보검정을 수행하였다.

실측값과 모의값의 오차 정도에 따른 모델 예측 정확도는 결정계수( $R^2$ )와 PBIAS(Percent bias)를 사용하여 평가하였다.  $R^2$ 는 1.0에 가까울수록 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영하는 것으로 판단한다. PBIAS는 모의치가 관측치보다 과대 또는 과소 평가되었는지의 평균 경향성을 판단하며 25% 이하이면 Very good, 25~40%이면 Good, 40~70%이면 Satisfactory로 평가한다(Table 1)(Moriassi *et al.*[2007]).

3. 결과 및 고찰

3.1 보검정결과

국립수산과학원의 지정해역 경계선 설정 부하량 조사지점인 염밭마을, 학림천, 수양천, 장치천·삼봉천, 미룡천 지점의 현장조사를 통해 측정된 유량 및 수질자료를 이용하여 모델의 정확도를 평가한 결과 유량의  $R^2$  값은 0.46~0.90의 범위로 평가되었다. 수질의 경우 TOC 모의 결과의 PBIAS 값은 절대값 기준으로 1.10~65.33의 범위로 평가되었으며, TN의 경우 PBIAS 값은 절대값 기준으로 4.21~64.10의 범위로 평가되었다. TP의 경우 PBIAS 값은 절대값 기준으로 0.11~64.93의 범위로 평가되어 보검정결과가 Moriassi *et al.*[2007]의 평가 기준으로 만족 이상인 것으로 나타났다.

강우시 통영 도심지 현장조사 결과를 이용한 보검정의 경우 유량은 실시간 수위계 자료를 이용한 데이터 수집으로 2018년 7월 20일~2018년 9월 30일 기간에 대해 보검정을 수행하였다. 유량 보검정 결과  $R^2$  값은 0.67로 평가되었으며 PBIAS 값은 36.5(절대값 기

Table 1. General performance ratings for PBIAS (%) for a monthly time step (Moriassi *et al.*[2007])

Performance Rating	Streamflow	Sediment	N, P
Very good	$PBIAS < \pm 10$	$PBIAS < \pm 15$	$PBIAS < \pm 25$
Good	$\pm 10 < PBIAS < \pm 15$	$\pm 15 < PBIAS < \pm 30$	$\pm 25 < PBIAS < \pm 40$
Satisfactory	$\pm 15 < PBIAS < \pm 25$	$\pm 30 < PBIAS < \pm 55$	$\pm 40 < PBIAS < \pm 70$
Unsatisfactory	$PBIAS > \pm 25$	$PBIAS > \pm 55$	$PBIAS > \pm 70$

Table 2. Performance indexes evaluated for flow, TOC, TN, TP at the monitoring points

Constituent	Index	Yeomanmaeul	Hakrimcheon	Suyangcheon	Jangchicheon·Sambongcheon	Miryongcheon
flow	$R^2$	0.46	0.9	0.76	0.75	0.74
TOC	PBIAS	-11.19	63.05	65.33	39.88	-1.1
TN	PBIAS	-16.05	-33.54	6.57	4.21	64.1
TP	PBIAS	-64.93	-0.11	19.54	-13.91	-9.71

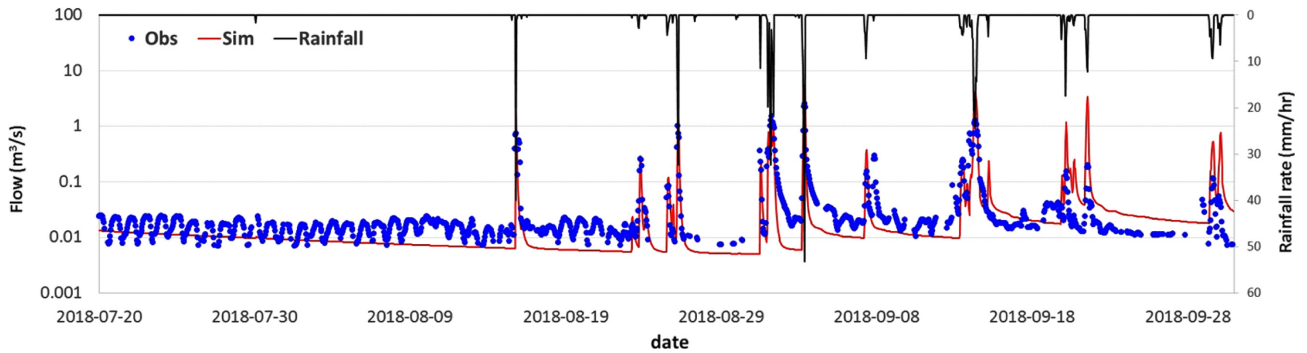


Fig. 6. Observed and simulated stream flow discharges at the Moojeon-dong station.

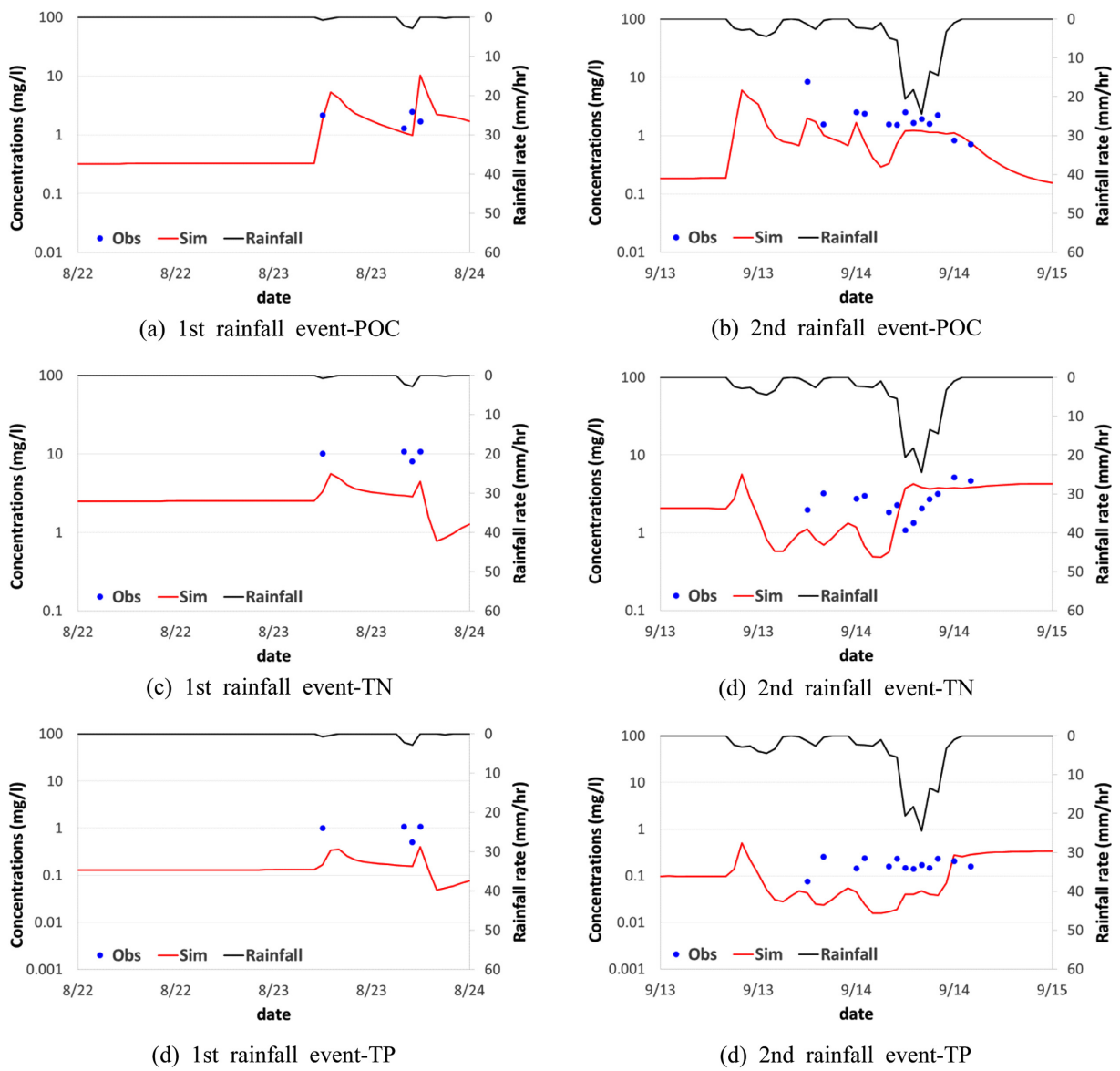


Fig. 7. Observed and simulated POC, TN, TP concentrations at the Moojeon-dong station.

준로 평가되었다. 수질의 경우 2018년 8월과 9월 각 1회씩 강우기 현장 조사를 통해 얻어진 자료를 이용하여 보검정을 수행하였다.

수질 모의 결과 POC, TN, TP의 PBIAS값은 각각 22.9, 37.9, 69.3(절대값 기준)으로 평가되었다. 수질 및 유량의 모의값은 관측

값의 경향성을 비교적 합리적으로 재현하고 있는 것으로 판단된다 (Fig. 6, 7). 본 연구에서의 강우기 보검정은 2회 현장조사 결과를 이용하여 수행한 결과로 추가 조사를 통해 다양한 형태의 강우 조사가 이루어진다면 좀 더 합리적인 유량 및 수질 재현성을 보일 것으로 판단된다.

저수지 저수율 보검정은 농어촌공사에서 제공되는 저수율 자료 중 대곡, 금단1 등 7개 지점의 2016년 1월 1일~2018년 9월 30일 기간 동안의 자료를 이용하여 보검정을 수행하였으며 R<sup>2</sup> 값은 0.163~0.787의 범위로 평가되었다. PBIAS 값은 2.4~16.1의 범위 (절대값 기준)로 평가되었다. 모의값은 관측값에 비해 조금 덜 예민한 수위 변화값을 보이지만 전체적인 경향성은 비교적 합리적으로 재현하고 있는 것으로 판단되었다.

### 3.2 오염원별 기여율 분석

연구 유역 내 위치한 하천들에 대해 TOC, TN, TP 각 부하량들에 대한 오염원 기여율을 분석하였다. 하천으로 유입되는 오염원을 점오염원과 비점오염원으로 구분하고 총 유입되는 오염원과 자란만·사량도 해역으로 유입되는 부하량을 비교하였다. 그 결과 TOC, TN, TP 각각 점오염원이 차지하는 비중이 11.3%, 67.6%, 66.5%로 분석되었다. TOC의 경우 점오염원보다는 비점오염원이 차지하는 비중이 큰 것으로 분석되었으며 TN, TP의 경우 점오염원의 비중이 절반 이상인 것으로 분석되었다. TOC의 경우 낙엽잔재물 등 산림기인 비점오염원의 영향이 크며, TN과 TP의 경우 상대적으로 하수처리장 방류수의 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다.

TN은 지하유출수를 통해 하천으로 오염원이 유입되는 비율이

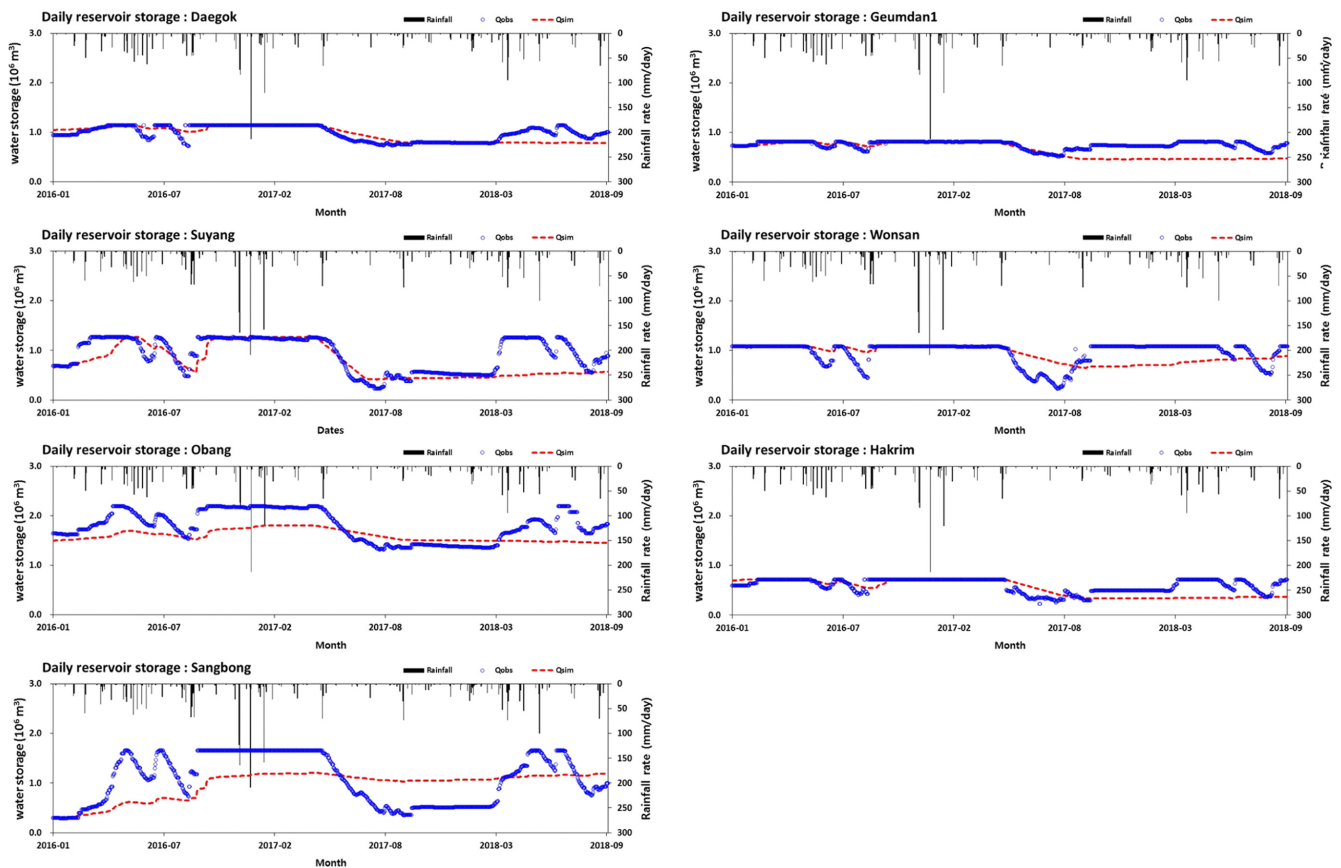


Fig. 8. Observed and simulated water storage rate at the reservoirs of study area.

Table 3. Estimated pollution contribution rate of the study area

Type	Sources	TOC		TN		TP	
		ton/year	%	ton/year	%	ton/year	%
Input	Point source	108.8	11.3	179.6	67.6	15.1	66.5
	Diffuse source	856.3	88.7	86.1	32.4	7.6	33.5
	Direct runoff	848.0	87.9	77.4	29.1	7.6	33.3
	Baseflow	8.3	0.9	8.7	3.3	0.1	0.3
	Total discharge	965.1	100.0	265.7	100.0	22.7	100.0
Reduction by attenuation		2.1	0.2	4.4	1.7	0.7	3.1
Output	Loads to the Sea	963.0	99.8	261.3	98.3	22.0	96.9



3.3%로 TOC와 TP의 지하유출수 비율인 0.9%, 0.3%에 비해 상대적으로 큰 것으로 분석되었다. 이는 질소가 용존성이 매우 높은 질산성 질소 형태로 상당부분이 지하수로 이동하는 특성(MOE[2013])에 의한 결과인 것으로 판단된다.

하천으로 유입되는 오염원이 해역으로 유입하는 비율의 경우 TOC, TN, TP 각각 99.8%, 98.3%, 96.9%로 하천으로 유입되는 오염원들이 대부분 해역으로 유출되는 것으로 분석되었는데 이는 경사도가 크고 유하거리가 짧은 하천이 대부분인 지역적 특성에 의해 중간소실량이 매우 적기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.3 자란만 해역으로의 유출특성 비교

연구 유역 내 위치한 하천 중 비교적 규모가 큰 하천인 오방천,

학림천, 수양천 등 10개의 지방하천에 대해 자란만-사랑도로 유입되는 연간 부하량의 하천별 비교를 수행하였다(Fig. 9). 유량의 경우 10개 하천의 유입량은 연간  $0.88 \times 10^6 \sim 9.29 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 범위를 보였으며 가장 유량이 큰 하천은 대독천, 가장 유량이 작은 하천은 장치천인 것으로 분석되었다. 탄소의 경우 연간 6.86~58.14 ton의 범위를 보였으며 탄소유입량이 가장 큰 하천은 대독천, 가장 작은 하천은 장치천인 것으로 분석되었다. 질소의 경우 각 하천에서 해역으로 유입되는 양은 0.77~7.15 ton의 범위를 보였으며 질소유입량이 가장 큰 하천은 대독천, 가장 작은 하천은 장치천인 것으로 분석되었다. 인의 경우 각 하천에서 해역으로 유입되는 양은 0.05~0.57 ton의 범위를 보였으며 인유입량이 가장 큰 하천은 산양천, 가장 작은 하천은 장치천인 것으로 분석되었다. 인유입량이 산양천에서 가장

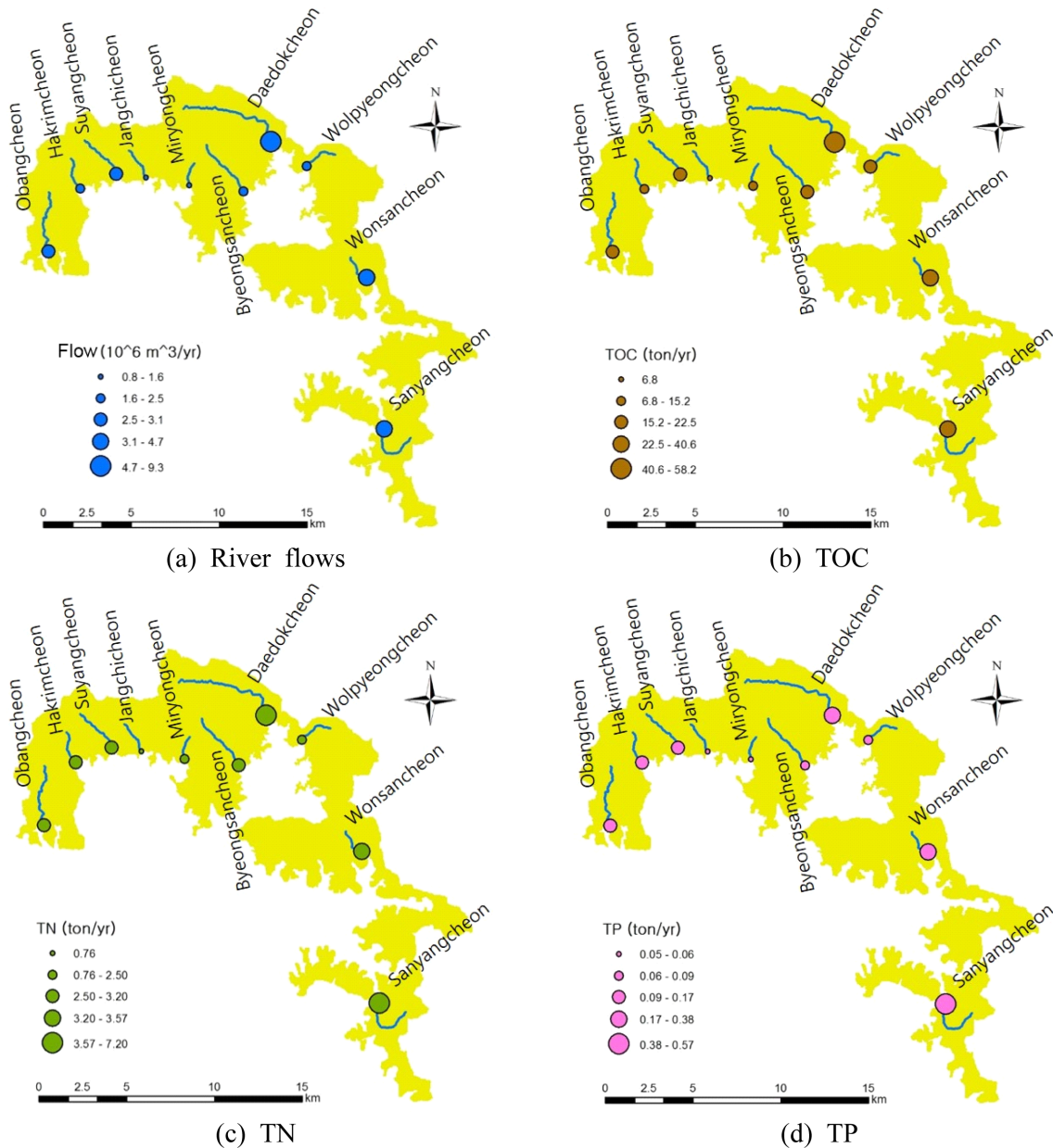


Fig. 9. Yearly flows and pollution loads of TOC, TN, TP from major streams in the Study Area.



**Table 4.** Yearly flows and pollution loads of TOC, TN, TP from major streams in the study area

Constituent unit	Flow m <sup>3</sup> /ha/yr	TOC kg/ha/yr	TN kg/ha/yr	TP kg/ha/yr
Obangcheon	3973.9	25.5	4.19	0.167
Hakrimcheon	4455.8	28.5	5.78	0.311
Suyangcheon	4536.2	32.9	4.27	0.217
Jangchicheon	4971.1	38.9	4.36	0.304
Miryongcheon	3791.0	33.1	4.43	0.138
Byeongsancheon	3645.1	34.0	4.48	0.143
Daedokcheon	5412.9	33.9	4.17	0.197
Wolpyeongcheon	3641.5	31.6	3.69	0.132
Wonsancheon	8341.1	72.1	6.39	0.680
Sanyangcheon	9123.7	82.1	10.84	1.150
Max	9123.7	82.1	10.84	1.150
Min	3641.5	25.5	3.69	0.132

큰 것을 제외하면 유량 및 오염물질의 유입량이 가장 큰 하천은 대독천이며 가장 작은 하천은 장치천인 것으로 분석되었는데 이는 하천 및 해당 하천의 유역규모에 크게 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

반면 상기 하천과 동일한 하천에 대해 각 하천별 단위면적당 유량, TOC, TN, TP 유입량을 산정한 결과 총 유입량과는 다른 모습을 보이는 것으로 분석되었다(Table 4). 단위면적당 유입유량은 유량, TOC, TN, TP 모두 대독천이 아닌 산양천이 가장 큰 것으로 분석되었다. 오방천이 단위면적당 TOC 배출부하량이 가장 적은 것으로 분석되었으며, 월평균이 단위면적당 유량, TN, TP 배출부하량이 가장 적은 것으로 분석되었다. 이는 육상오염원 관리 시 유역의 규모뿐만 아니라 유역의 유출 특성, 점오염원과 농업·도시 비점오염원 등 오염원의 분포 특성도 함께 고려해야 함을 시사한다.

전체 연구유역에서 자란만·사랑도 해역으로 유입되는 유량 및 오염물질 부하량을 월별로 분석하였다. 분석 결과 월별 유입유량은  $1.95 \times 10^6 \text{ m}^3 \sim 17.59 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 범위를 보이며 평균  $9.55 \times 10^6 \text{ m}^3$ 인 것으로 분석되었다. 월별 탄소유입부하량은 10.9 ton ~ 253.3 ton의 범위를 보이며 평균 80.2 ton인 것으로 분석되었다. 월별 질소유입부하량은 15.3 ton ~ 33.5 ton의 범위를 보이고 평균 22.5 ton인 것으로 분석되었으며, 월별 인유입부하량은 1.14 ton ~ 2.95 ton의 범위를 보이며 평균 1.83 ton인 것으로 분석되었다. 유량과 탄소, 질소의 부하량이 3월에 가장 큰 것으로 분석되었는데 이는 분석 기준년인 2018년의 경우 예년과 달리 연구지역 중 일부분에 3월중 많은 강우가 내렸기 때문인 것으로 판단된다.

8월과 9월에도 상당량의 강우가 있었으나 3월에 비해 탄소의 부하량이 월등히 적었는데 이는 탄소의 경우 질소나 인에 비해 퇴비나 비료 등 인공적인 비점오염물질 보다는 낙엽, 식물잔재물 등의 영향이 크며, 3월 이전에는 강우량이 적어 그동안 축적되었던 오염물질이 유출되었으나 8월이나 9월은 해당 월 이전에도 적정수준의 강우가 있어 축적량이 상대적으로 적었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 8월의 경우 강우량에 비해 유량이 상당히 적었는데 이는 7월 강우는 월 초에 집중되고 8월 강우의 경우 해당 월의 중반 이후에 집

중되어 토양수분이 상당량 증발되었으며 이로인해 강우의 상당부분이 토양으로 침투되거나, 논의 관개수로 사용되어 하천유출량이 상대적으로 적은 것으로 판단된다.

TN과 TP에 비해 TOC의 월별 변동폭이 더 큰 것으로 분석되었다. 이는 연구지역이 점오염원의 영향이 비교적 큰 지역으로 TN과 TP의 경우 점오염원의 일정한 부하량이 전체 부하량의 상당부분을 차지하기 때문에 부하량 변동폭이 적게 산정되고, TOC의 경우 TN과 TP에 비해 점오염원에 의한 영향이 적고 산림기원의 영향이 커 강우 변동에 의한 부하량 변동폭이 크게 산정된 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 논문은 자란만·사랑도 해역의 육상기인 오염부하량 평가를 위하여 연구 유역을 대상으로 STREAM 모델을 구축하고 보검정을 수행한 후 자란만 유입 부하량의 오염원별 기여율과 공간적, 시간적 유출특성을 분석하였다.

오염원별 기여율 분석 결과 연구유역은 하천으로 유입되는 오염원 중 점오염원의 비율이 TOC, TN, TP 각각 11.3%, 67.6%, 66.5%로 분석되어 점오염원이 차지하는 비율이 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 하천으로 유입되는 오염원이 해역으로 유출되는 비율의 경우 TOC, TN, TP 각각 99.8%, 98.3%, 96.9%로 유입된 오염원 대부분이 해역으로 유출되는 것으로 분석되었다. 하천으로 유입된 오염 부하량의 대부분이 해역으로 유출되는 것을 감안할 때, 자란만·사랑도 해역의 수질과 수생태 관리를 위해서는 점오염원, 비점오염원 유출관리가 무엇보다 중요하며, 특히 점오염원의 경우 오염원 관리에 따른 효과가 적지 않을 것으로 판단된다.

연구유역 내 대표 하천을 중심으로 자란만·사랑도 해역으로의 공간적 유출특성 분석결과 10개 하천의 자란만 해역 유입량은 연간  $0.88 \times 10^6 \sim 9.29 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 탄소 유입량은 6.86~58.14 ton, 질소 유입량은 0.77~7.15 ton, 인 유입량은 0.05~0.57 ton의 범위를 보이는 것으로 분석되었다. 인을 제외한 모든 항목에서 유입량이 최대치인 하천은 대독천이며, 최소치인 하천은 장치천인 것으로 분석되었다.

이러한 결과는 공간적 특이성보다 하천 및 유역 규모에 의해 나타난 차이로, 해역 관리 시 부하량이 큰 하천을 우선적으로 관리하면 효과적으로 자란만-사랑도 해역을 관리할 수 있을 것으로 판단된다. 한편 상기 하천과 동일한 하천들에 대해 각 하천별 단위면적당 유량, TOC, TN, TP 유입량을 산정할 경우 단위면적당 유입유량은 유량, TOC, TN, TP 모두 대독천이 아닌 산양천에서 가장 큰 것으로 분석되었다. 이는 육상오염원 관리 시 유역의 규모뿐만 아니라 유역의 유출 특성, 점오염원과, 농업-도시 비점오염원 등 오염원의 분포 특성도 함께 고려해야 함을 시사한다.

자란만 해역으로의 시간적 유출특성을 살펴보면, 강우량과 건기 일수에 따라 큰 변동폭을 보이는 것으로 분석되었다. 이에 따라 육상으로부터 유입되는 비점오염원 관리계획 수립 시 강우량, 강우 전 건기일수 등이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

또한 본 연구의 모의결과를 해역모델의 경계조건으로 제공하여 유역에서의 유출특성 및 이에 반응하는 해양생태계 변화를 예측함으로써 연안 해역관리를 위한 과학적 기반 구축에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구의 결과는 특정년도의 강우, 기상, 오염원 자료 및 수질 등 관측값에 기초한 보검정 결과에 의한 것이며 특정 지역의 연구 결과로, 일반화에는 어려움이 있지만 자란만-사랑도 해역의 어장관리 계획 수립 시 효율적인 방향 설정에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 논문은 2019년도 국립수산과학원 수산과학연구사업(R2019048) 지원으로 수행된 연구입니다.

## References

- [1] Chen, X., 2004, Modeling hydrodynamics and salt transport in the Alafia River estuary, Florida during May 1999–December 2001, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61(3), 477-490.
- [2] Cho, H.L., Jeong, E.S. and Koo, B.K., 2015a, Development of a Hybrid Watershed Model STREAM: Model Structures and Theories, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 31(5), 491-506.
- [3] Cho, H.L., Jeong, E.S. and Koo, B.K., 2015b, Development of a Hybrid Watershed Model STREAM: Test Application of the Model, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 31(5), 507-522.
- [4] Jeon, J.H., Yoon, C.G., Donigian, A.S. and Jung, K.W., 2007, Development of the HSPF-Paddy model to estimate watershed pollutant loads in paddy farming regions. *Agric. Water Manag.* 90, 75-86.
- [5] Jeong, E.S., Cho, H.L. and Koo, B.K., 2018, Estimation of Pollution Loads to the Geum-River Estuary for Precipitation Conditions Using a Semi-distributed Watershed Model STREAM, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 21(3), 216-227.
- [6] 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, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 37(8), 480-491.
- [7] 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, *J. Environ. Sci. Int.*, 21(8), 965-975.
- [8] Liu, Z., Hashim, N.B., Kingery, W.L., Huddleston, D.H. and Xia, M., 2008, Hydrodynamic modeling of St. Louis Bay estuary and watershed using EFDC and HSPF, *J. Coast. Res.*, 52, 107-116.
- [9] MOE, 2013, Development of technologies for management and vulnerability assessment of non-point source nitrate in groundwater, *Geo-Advanced Innovative Action Project*, 172-112-012.
- [10] Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L., 2007, Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- [11] NIER, 2014, Management measures of non-point source pollutants in Saemangeum watershed, *NIER-SP2014-324*.
- [12] Oh, S.J., Kim, H.J., Kwon, H.K., Yang, H.S. and Kim, S.Y., 2015, Effect of Nutrients on Competition among the Harmful Dinoflagellates *Cochlodinium polykrikoides* and the Diatom *Skeletonema* sp. in Jaran Bay Using a Mathematical Model, *J. Korean Soc. Ocean*, 20(2), 92-101.
- [13] Sakaguchi, A., Eguchi, S., Kato, T., Kasuya, M., Ono, K., Miyata, A. and Tase, N., 2014, Development and evaluation of paddy module for improving hydrological simulation in SWAT. *Agric. Water Manag.*, 137, 116-122.
- [14] Shim, K.B., Ha, K.S., Yoo, H.D., Kim, J.H. and Lee, T.S., 2009, Evaluation of the Bacteriological Safety for the Shellfish Growing Area in Jaranman, Saryangdo Area, Korea, *Kor. J. Fish. Aquat. Sci.*, 42(5), 442-448.
- [15] Williams, M.R., Fisher, T.R., Boynton, W.R., Cerco, C.F., Kemp, M.W., Eshleman, K.N., Kim, S.C., Hood, R.R., Fiscus, D.A. and Radcliffe, G.R., 2006, An integrated modelling system for management of the Patuxent River estuary and basin, Maryland, USA, *Int. J. Remote Sens.*, 27(17), 3705-3726.

Received 22 July 2019

1st Revised 2 October 2019, 2nd Revised 27 October 2019

Accepted 12 November 2019