

SWAT 모형을 이용한 조류발생 오염부하 삭감 효과 평가 (대청호를 중심으로)

태은아^{1†} · 채민희¹ · 조윤해¹ · 천세억¹ · 길기범¹ · 조형진¹

¹국립환경과학원 금강물환경연구소

Evaluation of Pollution Load Reduction Effect on Algae in Daecheong Lake using a SWAT Model

Eun-A Tea^{1†}, Min-Hee Chae¹, Yoon-Hea Cho¹, Se-Uk Cheon¹, Gi-Beom Kil¹, and Hyoung-Jin Cho¹

¹Geum River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Okcheon, 29027, Korea

Received June 19, 2019 / Revised November 26, 2019 / Accepted November 26, 2019

Daecheong Lake plays a major role in securing water resources in the central region. This lake is experiencing problems due to the yearly occurrence of algae and therefore, long-term monitoring of the lake is conducted to analyze water quality and tidal characteristics. It is found that pollutants containing large amounts of nitrogen and phosphorus are scattered in the upper stream of the Okcheon Stream, which is a tributary. Cyanobacteria grow in significant quantities every year due to sewage treatment plants. We use a SWAT model to evaluate pollutant reduction for different load scenarios. Our findings generally support that Scenario 3, the Farm Management, Point Pollution Reduction and Creation of an Overland Pond method can control the pollutants most efficiently, thereby reducing the amount of nutrients that flow into the river and suppressing the occurrence of algae.

Key words: SWAT model, Algae, Pollution load, BMPs

1. 서 론

국토 면적이 적고 하상경사가 급한 한반도의 특성상 수자원의 확보가 힘들기 때문에 대규모의 댐이나 보 같은 저류시설을 이용하여 안정된 용수공급을 확보해 왔다. 그러나 도시화와 산업화로 하천으로 유입되는 영양염류가 증가하면서 수체가 정체되어 있는 저류시설에 조류발생이 빈번해지고 이로 인해 수질이 악화가 발생한다. 대청호는 상습 조류 주의보 및 경보가 발령되고 있으며, 수자원 확보를 위해 건설되어 있는 대청호와 조정지법에 의해 저류시간이 길고 하절기 집중 호우 시 인근 축사와 농경지에서 많은 오염물이 유입되어 부영양화 현상이 빈번하다. 특히 상류 만입부에 위치한 소옥천은 매년 하절기 녹조 현상이 심하게 발생하며, 강우 시 본류로 유입하여 대청호 내 녹조 발생에 큰 원인

이 되고 있다.¹⁾

조류 저감 계획을 수립하기 위해서는 우선적으로 오염부하의 정량적 평가와 유입되는 과정에 대한 분석이 수행되어야 한다. 조류의 발생 원인으로는 대기의 기온이 높아 물속의 대류 현상을 억제하는 성층화와 댐 구조물 등에 의한 체류시간 장기화, 호소로 유입되는 질소와 인과 같은 영양염분의 과다공급으로 알려져 있다.²⁻⁵⁾ 성층화된 호수에서 조류 발생 및 소멸의 시공간적인 특성은 호소의 지형적 특성, 강우로 인한 호수내 대류현상, 영양염류의 이송확산 경로, 호소내에서 발생하는 복잡한 물리적 현상과도 밀접한 관련이 있다.⁶⁻⁹⁾

이렇듯 조류의 발생 및 소멸에는 다양한 인자가 영향을 미치기 때문에 정기측정망 자료가 많이 필요하지만 인력 부족 및 비용 부족 등으로 인해 정확한 조류 발생 원인 및 확산 과정을 규명하기에는 매우 어려운

[†]To whom correspondence should be addressed.

실정이다. 이런 한계를 극복하고 감시체계와 실험결과를 보완하기 위해서는 다양한 시나리오 적용이 가능한 수리·수질 모델링 연구가 필요하다. 1990년 후반부터 조류에 의한 피해가 대두되면서 조류의 발생 원인을 규명하기 위해 다양한 모형이 활용된 연구가 진행되어 왔고 최근 많이 활용되고 있는 모형으로 CE-QUAL-W2, EFDC-WASP(Environmental Fluid Dynamics Code-Water Quality Analysis and Simulation Program), ELCOM-CAEDYM(Estuary, Lake and Coastal Ocean Model-Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model) 등이 있다. 이 모형들은 수리학적 특성을 분석하여 호소내에서의 수질 및 조류의 변동을 해석하지만, 유역의 지형적 특성을 고려하여 강우에 의한 영양염분의 유입 경로와 물리적 입자의 이동성을 분석하는데는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 유역의 특성을 반영할 수 있고 장기 모의가 가능한 SWAT(Soil Water Assessment Tool)을 통해 조류발생에 큰 영향을 미치는 영양염류의 변화를 검토하였다.

미국 농무성(USDA, U.S. Department of Agriculture) 농업연구소(ARS, Agricultural Research Service.)에서 개발된 SWAT은 미계측지역의 오염부하를 예측하는데 적합하여 본 연구에서도 SWAT모형을 사용하였다. SWAT모형은 전세계적으로 다양한 분야에 활용된 이력이 있어 다양한 기후조건과 토양특성 및 토지이용상태에서 검증된 바 있다. 주로 광범위한 유역에서 수문 및 수질인자에 관한 개략적인 해석이 가능하여 국내외에서 많이 활용되고 있다.¹⁰⁻¹³⁾ 기존 SWAT 모형을 이용한 연구로는 토지이용별 비점오염 유출특성을 분석하

여 SWAT 모형내 영양물질에 관련된 매개변수를 최적화 연구가 수행되었고¹⁴⁾, 대청호 유역에 적용하여 장기 유출 특성을 분석하였고¹⁵⁾, 금강 유역에 비점오염물질 배출계수의 적용성 평가하였다.¹⁶⁾ 또 강우시 발생하는 비점오염원을 정량화하여 금호강 유역내 부하량을 해석을 하였다.¹⁷⁾ 이에 장기간 수질 모의를 통해 대규모 유역을 대상으로한 오염원 저감효과 분석에 SWAT 모형이 적당하다고 판단하여 본 연구에서는 대청호를 대상으로 SWAT 모델을 구축하고, 하수처리시설 증설 및 고도처리시설 설치에 따른 점오염원 저감효과, 천변저류지 설치에 따른 비점오염원 저감효과, 최적영농관리 방법(Best management practices, BMPs)에 따른 저감효과를 적용하여 오염부하량을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상지역

대청호는 인공호수로서 Fig. 1. 에서와 같이 충청남북도와 전라북도, 대전광역시 지역의 경계에 위치해 지역의 생활용수, 농공용수, 홍수조절 등에 이용되고 있는 중요한 수자원 시설이다. 대청호 상류에는 총 저수용량 815.0 백만 m³ 규모의 용담호가 위치하고 있으며, 이 대규모 시설을 이용하여 용수공급 및 홍수조절을 큰 역할을 하고 있다. 금강유역 최대 규모인 대청호는 유역면적 3,204.0 km², 총 저수용량 1,490.0백만 m³, 저수면적 72.8 km²로 한국에서 3번째로 큰 규모의 댐시설이다. 본 연구에서는 대청호의 수질 조사 지점 중 매년 조류 발생을 관찰하고 있는 장계지점의 자료를 검토정

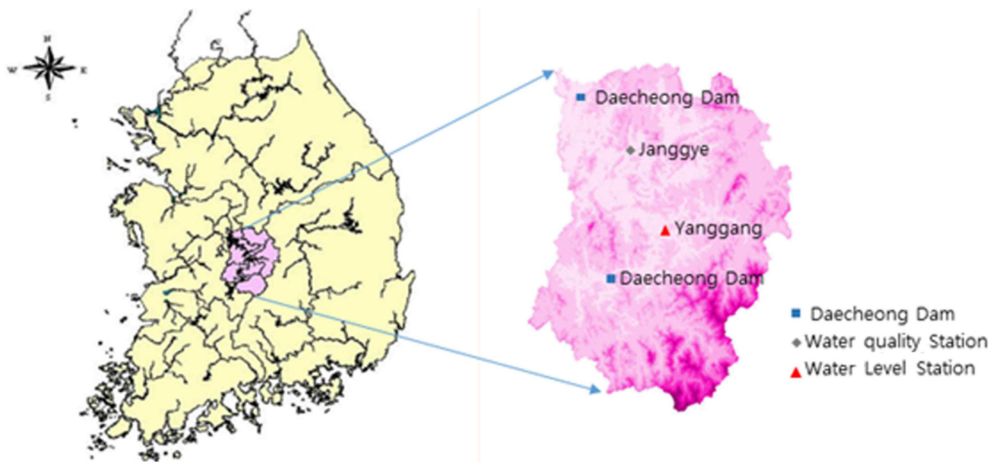


Fig. 1. Study area watershed and monitoring stations.

자료로 사용하였다. 장계 지점은 대청호 상류에 위치하고 있으며, 2014년 남조류의 발생으로 인해 심각한 생태계 교란이 발생했던 지점으로서 대청호의 수질 및 조류 모니터링의 주요 지점으로 활용되고 있다.

2.2. SWAT 모형 개요

본 연구에서는 유역모델링에 사용한 SWAT 모형은 준분포형 모형으로써 수문뿐 만 아니라 수질 및 유사에 대한 해석이 가능하여 국제적으로도 많이 이용되고 있다.¹⁸⁻²²⁾ 이 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA ARS, United States Department of Agriculture Agricultural Research Service)에서 토양의 특성과 이용상태를 고려하여 광범위한 지역에서의 물, 유사, 농업화학물 이동을 정량화하기 위해 개발되었다. 이 모형의 구성은 Fig. 2와 같이 총 4가지 Sub-module인 수문(hydrology), 토양 유실(erosion), 영양물질(nutrients/pesticides) 그리고 하도추적(main channel processes)으로 구성되어 있다.²³⁾ SWAT 모형은 지형조건을 기반으로 유체의 흐름과 오염원의 이동에 관하여 물리적 해석이 가능하며, 준분포형 모형이기 때문에 계산시간이 짧아 장기간 대규모의 유역을 대상으로 해석하는데 적합하다. 본 연구에서는 대청댐 유역 전체를 대상으로 장기간의 오염원 이동 해석을 통해 조류의 발생을 추정하고 오염원 저감 시나리오가 조류에 미치는 여부를 파악하고자 SWAT 모형을 선정하였다.

Fig. 2는 각 모듈별 해석범위를 나타낸 것이다. SWAT 모형의 수문 부분은 물수지 방정식을 기본으로 사용하고 있으며, 강우량, 직접유출, 증발산량, 침투, 회귀수량 등을 고려하여 계산한다. 식 (1)은 물수지 방정식을 나타내고 있다.²⁴⁾

$$SW = SW_0 + \sum_{t=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - P_{erc} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서, SW는 최종 토양수분량(mm), SW₀는 i일의 초기 토양수분량(mm), t는 시간(일), R_{day}는 i일의 강수량(mm), Q_{surf}는 i일의 지표유출량, E_a는 i일의 증발산량(mm), Perc는 i일의 토양층으로부터 투수층으로의 투수되는 총량(mm), 그리고 Q_{gw}는 i일의 회귀수량(mm)을 나타낸다.

SWAT 모형은 NRCS 유출곡선법과 Green and Ampt 침투법으로 직접유출 산정할 수 있으나, NRCS 유출곡선법이 일반적으로 많이 사용되고 있기 때문에 본 연구에서도 NRCS 유출곡선법을 이용하여 직접유출량을 산정하였다. 식 (2)는 직접유출량을 산정하는 NRCS 방법이다.²⁵⁾

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a - S)}, \quad S = \frac{2500}{CN} - 254 \quad (2)$$

여기서, I_a는 유출 이전에 발생하는 지면저류, 차단, 침투로 인한 초기손실(mm), S는 저류상수, 그리고 CN은 유출곡선지수를 의미한다.

SWAT 모형은 Penman-Monteith방법, Priestley-Taylor 방법과 Hargreaves 방법을 이용하여 증발산량을 산정할 수 있다. 이 중 Penman-Monteith 방법은 국제식량농업 기구(FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations)가 기준증발산 산정식들을 평가하는데 표준으로 사용하고 있어 본 연구에서는 Penman-Monteith 방법을 이용하여 증발산량을 산정하였다. 식 (3)은 증발산량을 산정하는 Penman-Monteith 방법이다.

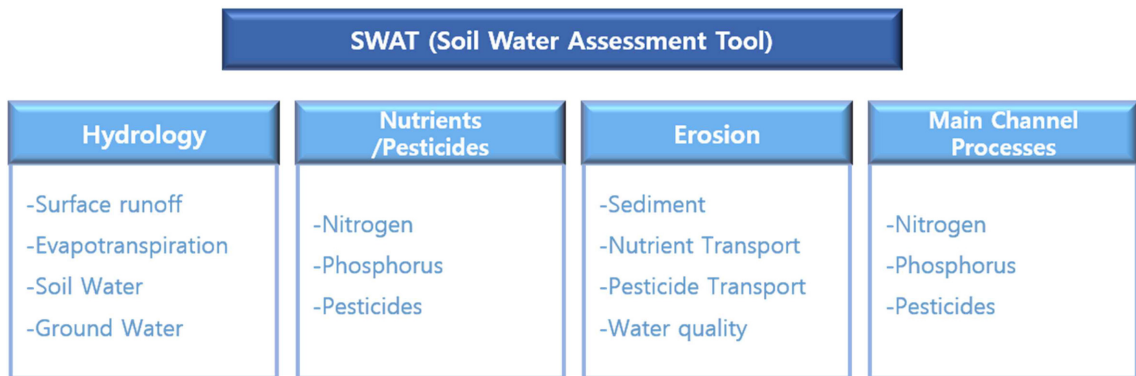


Fig. 2. Sub-modules of the SWAT Model.

$$\lambda E = \frac{\Delta(H-G) + \rho_{air} \cdot C_p \frac{(e_z^0 - e_z)}{r_a}}{\Delta + r \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (3)$$

여기서, λE 는 잠열유동(MJ/m²/day), H_n 은 순방사(MJ/m²/day), G 는 토양열 유동밀도(MJ/m²/day), ρ_{air} 는 일정한 대기압하의 평균대기밀도(kg/m³), C_p 는 대기의 비열(MJ/kg°C), r_a 는 표면저항(sec/m), 그리고 r_c 는 공기 동력학적 저항(sec/m)이다.

2.3. SWAT 모형 구축

SWAT 모형의 입력 자료로는 지형자료와 기상자료

두 가지가 필요하다. 지형자료는 DEM(Digital Elevation Model), 토지피복도, 토양도가 있으며, DEM은 국토지리정보원(<https://www.ngii.go.kr>)의 1:5000 수치지도를 이용하여 수치표고 자료를 만들어 사용하였다. 토지이용 상태를 파악할 수 있는 토지피복도는 환경공간정보서비스(<https://egis.me.go.kr>)에서 대분류와 중분류로 구분하여 제공하고 있으나, 본 연구에서는 모형의 계산시간 절감 및 매개변수의 단순화를 위해 중분류 토지피복도를 사용하였다. 토양의 종류를 특성 정보를 포함하고 있는 토양도는 국립농업과학원(<http://www.naas.go.kr>)에서 제공하고 있는 1:25,000의 정밀 토양도를 이용하였다. 본 연구에서 적용된 DEM, 토양도 및 토지이용도는 Fig. 3과 같다. 기상자료는 대상유역의 범위 내에 포

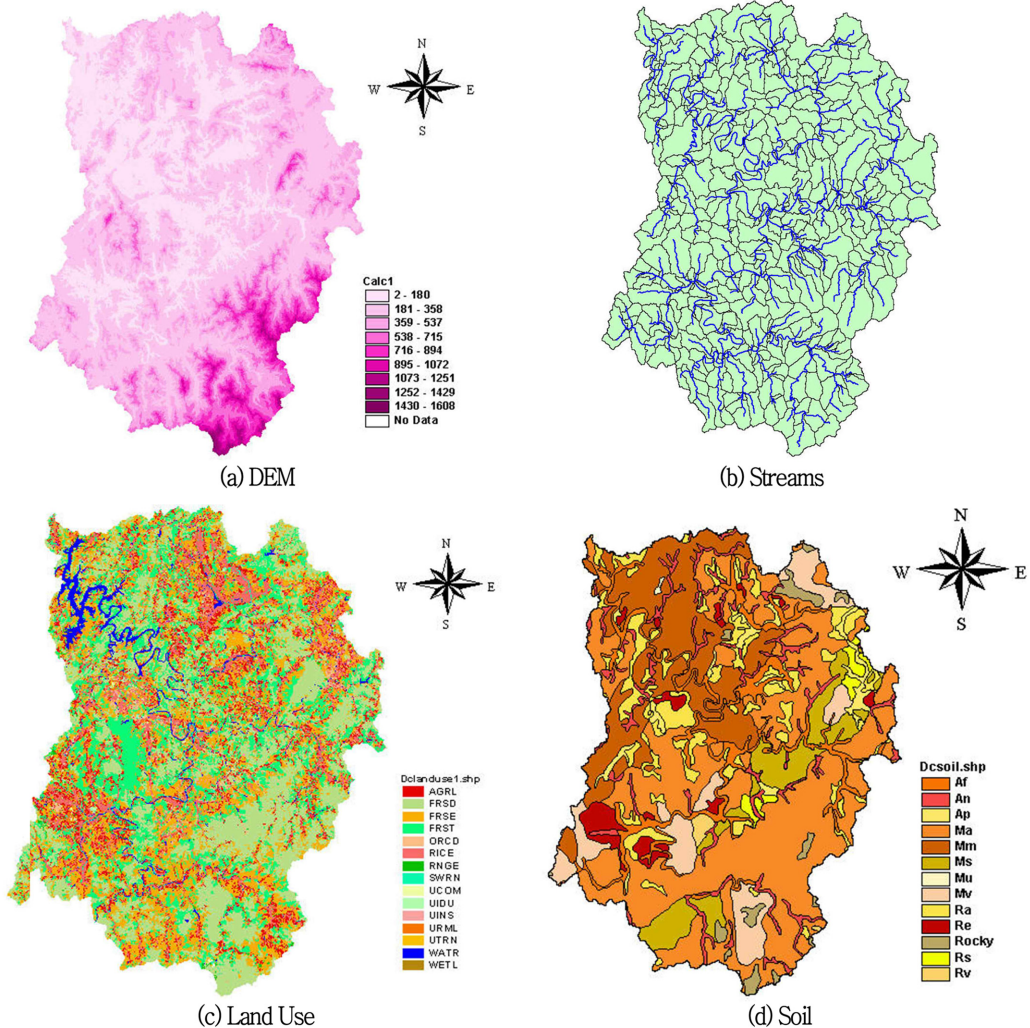


Fig. 3. GIS data of the deaching basin.

Table 1. Definition of the sub-basin

Input Data	Daechung Lake
Threshold area	8000 ha
Monitoring Point (Outlet)	- Dam : 1 point (Daechung Dam) - Water level station : 2 point (Iwon, Okchun)
Final Outlet	Daechung Dam
Number of sub-basins	42
Number of HRUs ^{a)}	925

^{a)}HRUs (Hydrostatic Release Unit)

함되어 있는 황강, 추풍령 2개의 기상관측소와 대상유역 외에 위치하고 있지만 티센망에 영향을 미치는 대전, 보은, 청주, 금산, 추풍령 5개의 기상관측소 자료를 활용하였다.

SWAT모형은 준분포형 모형으로서 소유역(Threshold area)의 구분으로 결과의 변화가 야기될 수 있기 때문에 소유역 분할이 매우 중요하다. Table 1은 모형 구축 시 소유역 데이터를 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수질 항목에 대한 SWAT 모형 검보정 결과

SWAT 모형은 수문 및 수질에 관한 다수의 매개변수를 포함하고 있기 때문에 모든 매개변수를 고려하기 어렵다. 이에 유출에 관련된 매개변수 보정은 Latin

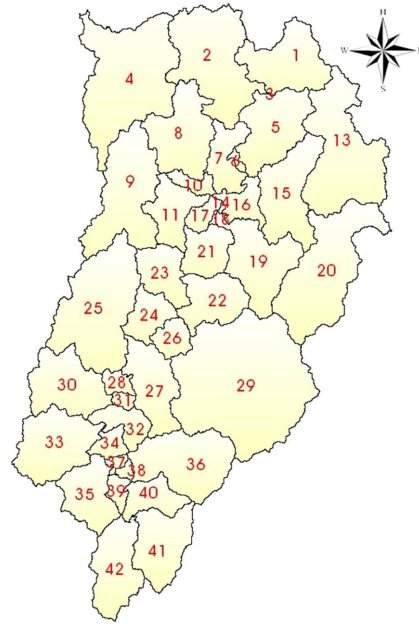


Fig. 4. Sub-basin of the daechung lake.

Hypercube(LH) 표본추출법과 국부적 민감도 분석 방법인 One-factor-At-a-time(OAT)방법을 결합한 LH-OAT 방법을 이용하여 매개변수 민감도 분석을 수행하였다. LH-OAT 방법을 이용한 민감도 분석 결과 GW_DELAY, gw, ERORGN.hru, PRF.bsn 매개변수가 가장 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. Table 2는 민감도 분석 결과 및 Trial and error 방법으로 매개변수 보정을 수행

Table 2. Definition of parameters and results of best fit calibration

Parameter	Definition	Best value	LH-OAT Number
GWQMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for occurrence of return flow (mm)	2100	0.03
GW_SPYLD.gw	Specific yield of the shallow aquifer (m ³ /m ³)	0.15	0.01
GW_DELAY.gw	Groundwater delay time (days)	4	0.23
LAT_TIME.hru	Lateral flow travel time (days)	36	0.17
SLSOIL.hru	Slope length for lateral subsurface flow (m)	29	0.14
ERORGN.hru	Organic N enrichment ratio for loading with sediment	4	0.29
ERORGP.hru	Phosphorus enrichment ratio for loading with sediment	5	0.07
CN2.mgt	SCS runoff curve number for moisture condition II	79	0.12
RS2.swq	Benthic (sediment) source rate for dissolved phosphorus in the reach at 20°C (mg dissolved P/(m ² -day))	0.002	0.13
RS3.swq	Benthic source rate for NH4-N in the reach at 20°C (mg NH4-N/(m ² -day))	0.15	0.17
RS4.swq	Rate coefficient for organic N settling in the reach at 20°C (day-1)	0.002	0.14
RS5.swq	Organic phosphorus setting rate in the reach at 20°C (day-1)	0.003	0.12
PRF.bsn	Peak rate adjustment factor for sediment routing in the main channel	1.4	0.28
NPERCO.bsn	Nitrate percolation coefficient	0.07	0.14
PPERCO.bsn	Phosphorus percolation coefficient (m ³ /Mg)	11	0.11

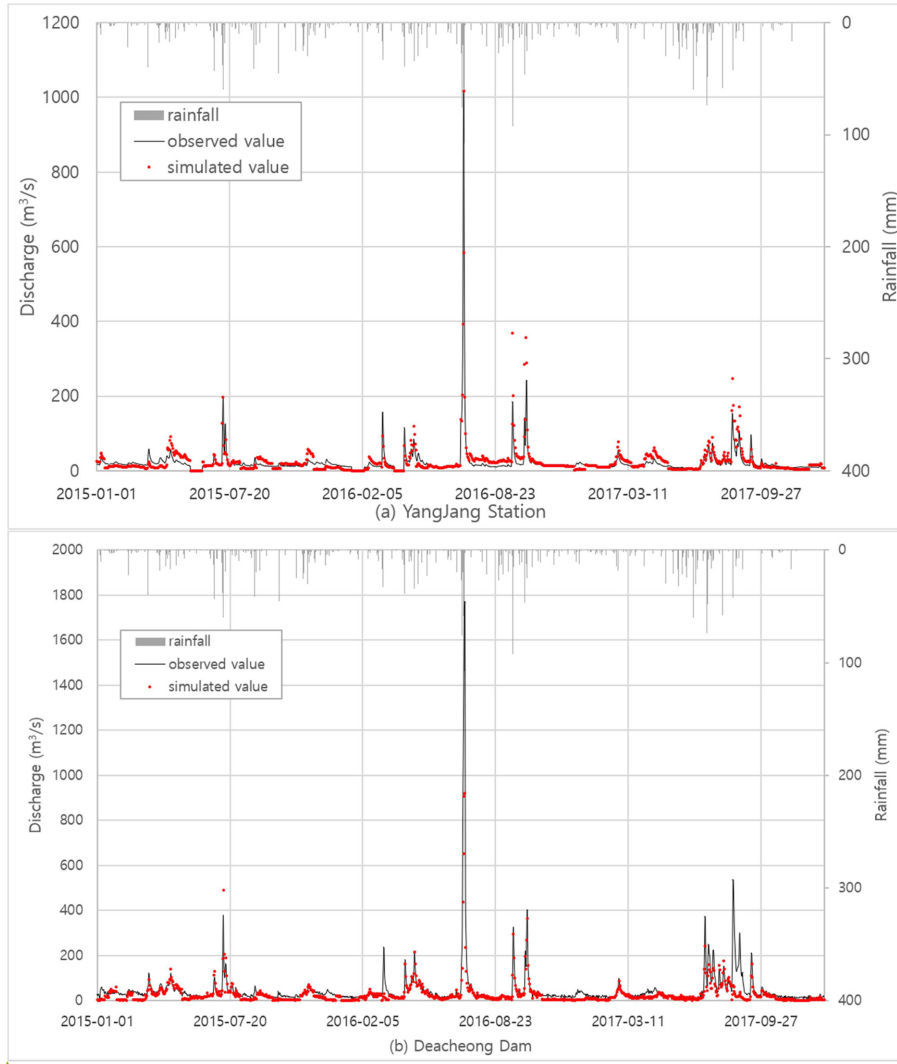


Fig. 5. The observed vs. SWAT-simulated flow comparison results.

한 결과를 나타내고 있다. Fig. 5는 대청호 유입과 양장 수위관측소에서의 모의치와 관측치 비교 결과이며, 보정 결과 결정계수는 각각 92.12%, 87.22%로 나타났으며, 대체적으로 강우 이벤트 시 유량의 변화에 잘 상응하는 것으로 나타났다.

수질 보정지점인 장계 지점에 대해 T-N, T-P, SS를 대상으로 보정을 실시한 결과(Fig. 6, Table 3), 각 수질 항목별 관측치와 모의치 간의 결정계수는 T-N항목이 65.32%, T-P 항목이 59.28%, SS 항목이 72.04%로 나타났고 유출 항목의 보정결과에 비해 다소 떨어지는 결과를 나타냈다. 하지만 조류발생에 영향을 미치는 인자들이 매우 많으며, 매개변수간의 복잡한 연관성이 있다.

부영양화 물질에 대한 관측자료 샘플방법이나 측정방법 등에 따른 큰 오차가 발생할 수 있다는 점을 고려하였을 때 대청호의 부영양화 장기모니터링에 기초자료로는 사용 가능할 것으로 판단된다.

3.2. 시나리오별 설정

대청호 상류유역에 수질관리 영향을 모의하기 위하여 시나리오1은 점오염부하량삭감, 시나리오2은 천변저류지 조성을 가정하였으며, 시나리오3은 최적영농관리+점오염부하량삭감 및 천변저류지조성점오염부하량 삭감을 모두 고려하였다. 대청호상류 유역의 수질관리 영향을 오염부하 삭감에 관한 3가지 시나리오를 가정하여 평

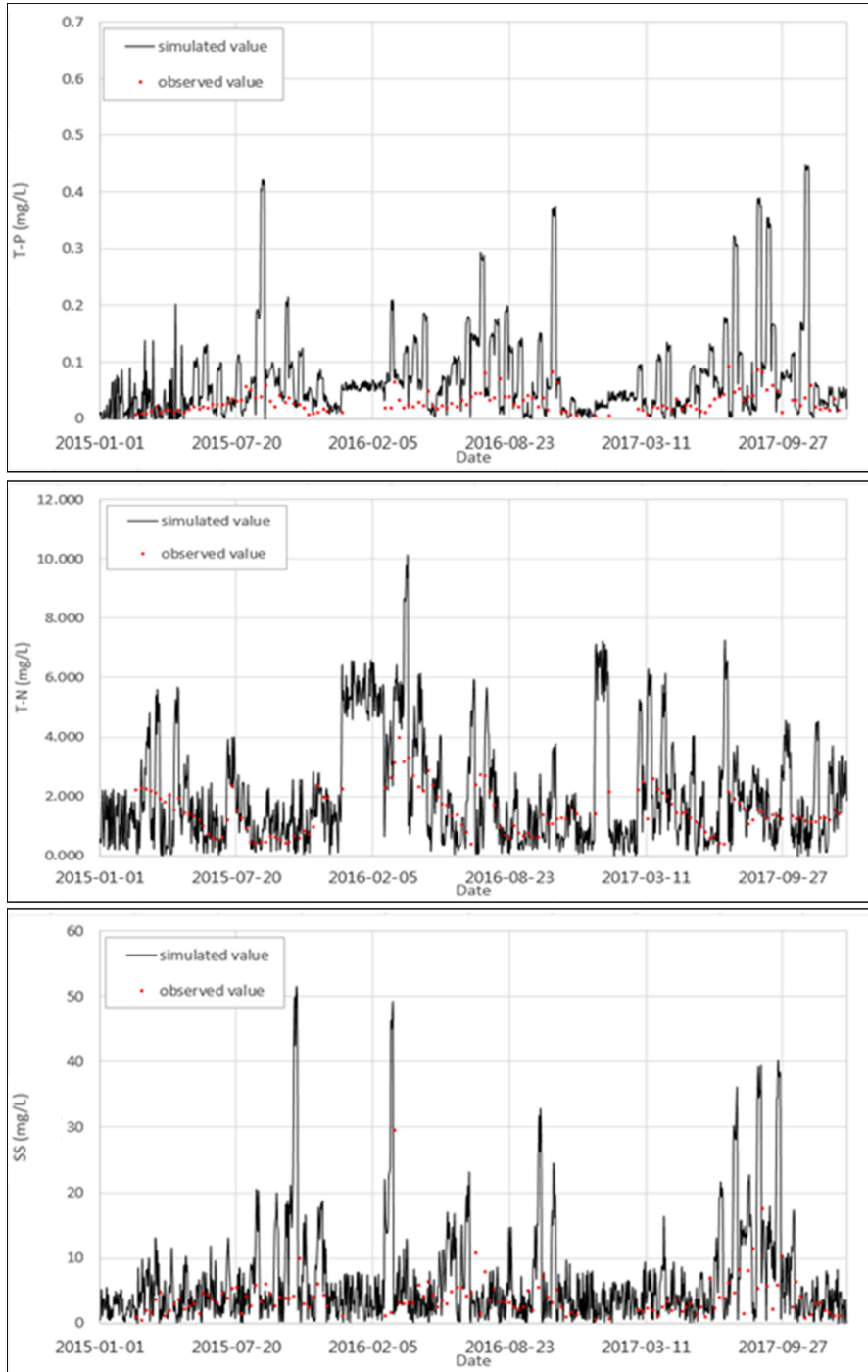


Fig. 6. Observed vs. SWAT-simulated SS, T-N, and T-P comparison results.

가하였다.

시나리오1은 하수처리장의 개선(시설의 증설, 고도처리시설의 추가)을 통해 하수처리율을 향상시키는 것이

다. 하수처리장 공정의 개선은 SS가 약 95%, 영양물질은 약 60% 정도 처리 효율이 상승할 수 있다.²⁴⁾ 하지만 하수처리장의 공정상 최대 효율을 발생하지 못하는

경우를 고려하여 SS와 영양물질 처리는 기존 하수처리율의 50%를 추가 저감이 가능한 것으로 가정하여 모형을 구축하였다.

시나리오2는 천변저류지 조성으로 저류지를 통한 전처리 습지와 추가 처리 효과를 유도하고자 하였다. 수

변구역 내 천변저류지는 모의저류지-습지 시스템으로 조성되는 것을 가정하였으며, 수리학적 부하는 1.000 m³/ha.day, 습지내 SS침전은 매월 발생하여 습지내 침전물의 평균농도인 20 mg/L로 초기화 된다고 가정하였고, 습지내 인의 침전율은 0.7 m/year, 질소의 침전율은 0.3 m

Table 3. Selected model parameters for BMP scenarios

BNP	Function	Representative SWAT parameter		
		Variable (Input file)	Value with no BMP	Value with no BMPs in good condition
Grassed swale	Increase channel cover	CH_COV	1.0	0.25
	Reduce channel erodibility	CH_EROD	0.6	0.15
	Increasing channel roughness	CH_N2	0.14~0.28	0.24
Contour farming/ parallel terrace	Reduce overland flow	CN2	83	62
	Reduce sheet erosion	USLE_P	1.0	0.54
Field border	Increasing sediment trapping	FILTERW	0	5
Farm retention pond	Present pothole	POT_FR	0	0.3
		POT_TILE	0	0.1
		POT_VOLX	0	0.05
Grade stabilization structure	Reduce gully erosion	CH_EROD	0.6	0.15
	Decrease cover factor	USLE_C	Assigned by SWAT	0.05

Table 4. Results of concentration change for each scenario

	Year	Concentration /percentage change	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	
T-P	2015	Concentration (mg/L)	0.094	0.089	0.091	0.07	
		Percentage change (%)		-5.32	-3.19	-25.53	
	2016	Concentration (mg/L)	0.048	0.044	0.046	0.035	
		Percentage change (%)		-8.33	-4.17	-27.08	
	2017	Concentration (mg/L)	0.043	0.04	0.041	0.03	
		Percentage change (%)		-6.98	-4.65	-30.23	
	Average	Concentration (mg/L)	0.062	0.058	0.059	0.045	
		Percentage change (%)		-6.88	-4.00	-27.62	
	T-N	2015	Concentration (mg/L)	2.412	2.313	2.365	1.949
			Percentage change (%)		-4.10	-1.95	-19.20
		2016	Concentration (mg/L)	2.342	2.159	2.244	1.684
			Percentage change (%)		-7.81	-4.18	-28.10
2017		Concentration (mg/L)	1.712	1.542	1.603	1.313	
		Percentage change (%)		-9.93	-6.37	-23.31	
Average		Concentration (mg/L)	2.155	2.005	2.071	1.649	
		Percentage change (%)		-7.28	-4.17	-23.53	
SS		2015	Concentration (mg/L)	8.901	7.796	8.153	3.117
			Percentage change (%)		-12.41	-8.40	-64.98
		2016	Concentration (mg/L)	4.213	3.824	3.964	1.215
			Percentage change (%)		-9.23	-5.91	-71.16
	2017	Concentration (mg/L)	5.717	4.81	4.917	1.305	
		Percentage change (%)		-15.86	-13.99	-77.17	
	Average	Concentration (mg/L)	6.277	5.477	5.678	1.879	
		Percentage change (%)		-12.50	-9.44	-71.11	

/year로 가정하였다. 천변저류지 조성은 앞서 언급한 조건으로 장계 지점 4 km 상류에 가상의 습지(pond)을 설정하여 SWAT 모형으로 재현하였다.

시나리오3은 최적영농관리, 점오염부하량삭감 및 천변저류지 조성을 모두 가정한 방안이다. 최적영농관리 방안은 비점오염물질의 발생 억제를 위해 효율적인 시비 및 비료억제 등을 통한 오염원 발생 억제, 토양보비력 증가, 침투율 증가, 토양유실방지 등을 효과를 볼 수 있다. 최적영농관리 후 하천수질개선 SWAT모형의 pnd 파일내의 매개변수를 Table 3과 같이 조정하여 천변저류지를 적용하였다.

3.3. 시나리오별 오염저감 효과

대청호의 시나리오 별 모델링 수행 결과는 Table 4와 같다. 모델링 수행기간 중 2015년도의 수질 항목들의 농도가 다른 해에 비해 높았던 것으로 나타났다. 연도별 강우량을 비교하면 2016년의 강우량이 가장 높으나, 강우일수로는 2015년이 예년에 비해 많기 때문에 비점오염원의 유출이 많아 T-P, T-N, SS의 유출이 다소 많은 것으로 나타났다.

각 시나리오들은 수질이 악화되는 시기에서의 수질 개선 효과가 큰 것으로 나타났다. 3년 평균 저감 효과는 시나리오1의 경우 T-P가 6.88%, T-N은 7.28%, SS는 12.50%로 나타났다. 시나리오1은 하수처리장 개선을 통해 점오염량을 줄이기 때문에 SS 저감에 큰 효과를 보였다. 시나리오 2의 경우는 T-P가 4.00%, T-N은 4.17%, SS는 9.44% 저감 효과를 보였다. 시나리오 2는 천변저류지를 설치하여 하천수의 저류시간을 증가시켜 오염물을 줄이는 방법으로써, 하수처리장과 같이 직접적으로 오염원을 줄이지는 못하기 때문에 큰 효과를 보이지는 않았다. 마지막으로 시나리오 3의 경우는 T-P가 27.62%, T-N은 23.53%, SS는 71.11% 저감 효과를 보였다. 시나리오 3은 점오염원 뿐만 아니라 비점오염원까지 모든 오염원의 정량적 양을 줄일 수 있기 때문에 수질 개선에 큰 도움이 되는 방법으로 나타났다. 다른 시나리오 비해 시나리오 3의 수질 개선 폭이 크게 나타났고 이는 대청호에 유입되는 점오염원 보다는 비점오염원 제어가 수질 개선에 더욱 중요하다는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 조류 발생으로 인해 많은 문제를 갖고 있는 대청호를 대상으로 SWAT 모형을 구축하고 점

및 비점오염 부하량에 대한 삭감 대책 시나리오별 오염부하량 삭감 효과를 평가하였다. 대청호의 상류지역은 농업용 부지가 많이 조성되어 있어 다량의 질소, 인 함유된 오염원을 발생하는 대청호에 수질에 큰 영향을 주고 있다. 이에 수질관리 영향을 평가하기 위해 오염부하 삭감 방법인 점오염부하량삭감, 천변저류지 조성, 최적영농관리를 조합한 3가지 시나리오를 적용하여 SWAT 모형을 구축하고 이를 분석하였다. 그 결과 3가지 오염부하 삭감 방법을 모두 적용한 시나리오3이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 점오염부하량 삭감 방안을 적용한 시나리오1과 천변저류지 조성을 적용한 시나리오2는 농경지가 많이 분포하고 있는 대청호 상류 지역에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났고, 최적영농관리 방안이 포함된 시나리오 3의 결과가 가장 큰 저감효과를 나타냈다. 시나리오3의 결과를 통해 농경지에서 발생하는 비점 오염량 관리가 수질개선의 가장 효과적인 방법으로 판단된다.

본 연구 결과는 대청호에 조류 수화발생을 억제하기 위해 수질을 개선 방법별 효과 정도를 파악하였고, 이를 통해 오염부하량 삭감 및 대청호 조류발생 억제 대책을 수립하는데 기초 자료로 활용할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2018-03-03-002).

참고문헌

1. 박형석, 윤성완, 정세웅, 황현식, “소옥천 유역의 오염제어 대책에 따른 대청호 조류저감 효과 분석”, 환경영향평가, **2016**, 25, 4, 248-260.
2. D. R. Richard and T. Zohary, “Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom? forming cyanobacteria”, *Journal of New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, **1987**, 21, 391-399.
3. H. S. Cao, F. X. Kong, L. C. Luo X. L. Shi, Z. Yang, X. F. Zhang, and Y. Tao, “Effects of wind and wind-induced waves on vertical phytoplankton distribution and surface blooms of *Micricystis aeruginosa* in Lake Taihu”, *Journal of Freshwater Ecology*, **2006**, 21, 231-238.
4. R. G. Wetzel, “Limnology; Lake and reservoir ecosystems”, Academic Press, 2001.
5. 오광철, 오희목, 이진환, 이지열, 맹주선, “대청호 수계

- 내 식물플랑크톤의 일주성 수직 분포”, *한국생물과학협회 학술발표대회 논문집*, **1994**, 144-144.
6. B. J. Robson and D. P. Hamilton, “Three-dimensional modelling of a *Microcystis* bloom event in the Swan River estuary, Western Australia”, *Ecological Modelling*, **2004**, 174, 203-222.
 7. J. Schuol, K. C. Abbaspour, R. Sarinivasan, and H. Yang, “Estimation of freshwater availability in the West African Subcontinent using the SWAT hydrologic model”, *Journal of Hydrology*, **2008**, 352, 30-42.
 8. R. H. Spigel and J. Imberger, “Mixing processes relevant to phytoplankton dynamics in lakes”, *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, **1987**, 21, 361-377.
 9. T. U. Chan, D. P. Hamilton, B. J. Robson, B. R. Hodges, and C. Dallimore, “Impacts of hydrological changes on phytoplankton succession in the Swan River, Western Australia”, *Estuaries*, **2002**, 25, 1406-1415.
 10. S. Shrestha, B. Bhatta, M. Shrestha, and P. K. Shrestha, “Integrated assessment of the climate and landuse change impact on hydrology and water quality in the Songkhram River Basin, Thailand”, *Science of The Total Environment*, **2018**, 643, 1610-1622.
 11. 이길성, 정은성, 신문주, 김영오, “SWAT 모형을 이용한 도시하천 상류유역의 하천유지유량 산정방안”, *한국수자원학회논문집*, **2006**, 39, 703-716
 12. 정한석, 김학관, 성충현, 장태일, 박승우, “SWAT 모형을 이용한 하수처리장 방류수의 관개용수 유황 영향 분석”, *농업생명과학연구*, **2013**, 44, 32-38.
 13. 최윤석, 김경탁, 심명필, “분포형 강우-유출 모형을 이용한 미계측 중소유역의 유량 추정”, *한국수자원학회논문집*, **2010**, 43, 353-365.
 14. 김기윤, “SWAT 모형에 의한 밭과 임야에서의 비점오염원 유출 특성” 한밭대학교 산업대학원, 석사학위논문, **2007**.
 15. 심상보, “SWAT 모형을 이용한 대청호 유역의 비점오염물질 유출특성 연구”, 청주대학교 대학원, 석사학위논문, **2006**.
 16. 이은정, “SWAT 모형을 이용한 비점오염물질배출계수 적용성 평가”, 청주대학교 대학원, 석사학위논문, **2015**.
 17. 김수용, “SWAT을 이용한 금호강 유역의 비점오염원 정량화 분석”, 경북대학교 산업대학원, 석사학위논문, **2008**.
 18. A. K. Gosain, S. Rao, and D. Basuray, “Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basin”, *Current Science*, **2006**, 90, 149-165.
 19. B. Narasinmhan, R. Srinivasan, J. G. Arnold, and M. Di Luzio, “Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrologic model and verification using remotely sensed data”, *Journal Transactions of the ASAE*, **2005**, 48, 1101-1113.
 20. J. G. Arnold and P. M. Allen, “Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds”, *Journal of hydrology*, **1996**, 176, 57-77.
 21. 이근상, 김유리, 예령, 이을래, “GIS 기반 SWAT 모형을 이용한 동향 천천유역의 부유사량 분석”, *한국지리정보학회지*, **2009**, 12, 82-98.
 22. J. Yang, P. Reichert, K. C. Abbaspour, and H. Yang, “Hydrological modelling of the Chaohe basin in China : Statistical model formulation and Bayesian inference”, *Journal of Hydrology*, **2007**, 340, 167-182.
 23. 김정근, 손경호, 노준우, 이상욱, “SWAT 모델을 이용한 임하안동 유역의 부유사량 발생량 추정”, *대한환경공학회지*, **2008**, 30, 1209-1217.
 24. 오경희, 조영철, “대청호 추수 및 추동 수역 퇴적물의 오염도 평가”, *대한환경공학회지*, **2015**, 37, 277-284.
 25. P. L. Donaghay and T. R. Osborn, “Toward a theory of biological?physical control of harmful algal bloom dynamics and impacts Limnol”, *Oceanogr*, **1997**, 42, 1283-1296.