

# AQUATOX 모델을 이용한 낙동강 하구역의 총일차생산량 및 생물체 호흡량 예측 모델링

## Simulating the Gross Primary Production and Ecosystem Respiration of Estuarine Ecosystem in Nakdong Estuary with AQUATOX

이 태 윤<sup>†</sup> · 호앙티란안<sup>1)</sup> · 응우엔트린<sup>2)</sup> · 한 경 수<sup>3)</sup>

Taeyoon Lee · Thilananh Hoang · Duytrinh Nguyen · Kyongsoo Han

Received: December 21<sup>st</sup>, 2020; January 6<sup>th</sup>, 2021; Accepted: February 10<sup>th</sup>, 2021

**ABSTRACT** : The purpose of this study is to establish an ecosystem model that can predict ecosystem fluctuations in the Nakdong estuary, and use this model to calculate total primary production and respiration. AQUATOX model was used as the ecosystem model, and the model was calibrated and verified using the measured data. For the calibration of the model, chlorophyll-a data measured at the Nakdong estuary were used, and the model verification was performed using DO, TN, and TP data. In general, the total primary production and respiration volume vary greatly depending on the season, but the total primary production and respiration in the Nakdong estuary were greatly influenced by the amount of water discharged from Nakdong estuary bank. When the amount of effluent increased, photosynthesis could not be performed due to the loss of phytoplankton living in the lower area, and the total primary production amounted to zero, whereas the respiration increased sharply due to the inflow of organic substances contained in the effluent. The increase in the inflow water means the inflow of organic substances contained in the inflow water, and the organic substances are decomposed by oxidation, reducing dissolved oxygen. Compared with other countries' estuaries, the Nakdong estuary shows the lowest total primary production and because the respiration is larger than the total primary production, the dissolved oxygen is depleted by the oxidation of organic matter.

**Keywords** : Nakdong estuary, AQUATOX, Chlorophyll-a, Gross primary production, Respiration

**요 지** : 본 연구는 낙동강 하구역에 대한 생태계 변동을 예측할 수 있는 생태계 모델을 구축하고 이 모델을 이용하여 총일차생산량과 호흡량을 산정하고자 하였다. 생태계 모델을 AQUATOX 모델을 사용하여 구축하였고 측정된 자료를 이용하여 모델의 검량과 검증을 하였다. 모델의 검량은 낙동강 하구역에서 측정된 클로로필-a 자료를 사용하였고, DO, TN, TP 자료를 이용하여 모델 검증을 수행하였다. 총일차생산량과 호흡량은 계절에 따라 큰 차이를 보이는 것이 일반적이나 낙동강 하구역의 총일차생산량과 호흡량은 하굿둑 방류수의 양에 크게 영향을 받았다. 방류수의 양이 증가할 때는 하구역에 서식하는 식물성 플랑크톤의 유실로 인해 광합성을 할 수 없어 총일차생산량은 0에 수렴하였고, 반면 방류수에 포함된 유기물질의 유입으로 인해 호흡량이 급격히 증가하였다. 유입수량의 증가는 유입수에 포함된 유기물질의 유입을 의미하며, 이 유기물질은 산화작용에 의해 분해되면서 용존산소를 감소시켰다. 다른 나라의 하구역과 비교 시 낙동강 하구역은 총일차생산량이 가장 적은 것으로 나타났고 호흡량이 총일차생산량보다 크기 때문에 유기물의 산화작용에 의해 용존산소를 고갈시키는 상태인 것으로 확인되었다.

**주요어** : 낙동강 하구역, AQUATOX, 클로로필-a, 총일차생산량, 호흡량

## 1. 서 론

낙동강과 남해가 만나서 염분구배가 발생하는 전이 생태계로 분류되는 낙동강 하구역은 다양한 생물들의 산란 및 서식처로 이용이 되며, 상류로부터 유입되는 오염물질 제거 기능, 다양한 수산물 생산, 해상을 통한 운송 등과 같은 중요한 생태적·사회경제적 가치를 지니고 있다(Park et al.,

2016). 중요한 생태적 보고인 낙동강 하구역은 주변의 대규모 개발 사업으로 인해 환경악화와 생태계 훼손 우려가 커지고 있는데, 2000년대 이후 낙동강 하구에서 진행된 개발 사업은 녹산국가공업단지, 신호일반산업단지, 화전일반산업단지 및 부산 신항만 개발 사업이 있다. 이러한 대규모 개발 사업에 앞서 1987년 11월에 완공된 낙동강 하굿둑 건설은 방류수의 정체, 해양과의 단절로 인한 염분 감소로 인해 수

† Professor, Department of Environmental Engineering, Pukyong National University (Corresponding Author : badger74w@pknu.ac.kr)

1) Master Student, Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

2) Post-Doctoral Researcher, Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

3) Professor, Department of Spatial Information Engineering, Pukyong National University

계환경에 큰 영향을 주고 있다. 낙동강 중류지역의 하수처리장 방류수 및 비점오염원에서 배출된 영양물질 및 오염물질이 낙동강 하굿둑으로 인해 해양으로 배출되지 못하여 하굿둑 인근의 수질악화 및 대규모 녹조현상(algal bloom)을 유발시켰다(Jeong et al., 2007). 낙동강 하굿둑의 수문개폐에 따른 담수의 주기적 방출로 인한 하구역에서의 유속 변화와 염분 분포에 대한 연구와 하구둑 방류량에 따른 하구역의 해양물리환경의 변화 연구를 통해 하굿둑 건설에 따른 생태환경 변동을 파악할 수 있다(Song et al., 2014; Park et al., 2008).

낙동강 하구역의 저서생태계에 대한 연구는 하굿둑 건설 이전에는 체계적인 연구조사보다는 단편적인 조사가 이루어졌으나, 하굿둑 건설 후에는 장마기 탁도의 증가와 체류시간 감소로 인한 Chl-a, TP, TN의 농도 감소 및 수질향상 방안을 제시한 연구, 낙동강 플랑크톤 군집 동태에 관한 연구, 식생분포에 관한 연구, 부영양화의 지표인 클로로필-a의 농도에 관한 연구 등이 지속적으로 수행되었다(Shin et al., 2002; Park et al., 2001; Lee & An, 2012).

기존의 수질모델링 기법(QUAL2E, STREAM, WQRRS, WASP, EFDC, QUALKO)은 수질 적정관리방안, 환경영향, 미래의 수질예측 등에 효과가 있으므로 수질관리정책에 유용하게 사용되어 왔으나, 이들 수질모델은 수생태계 내에서의 영양물질, 독성물질의 이동 및 생태계에 미치는 영향, 오염물질의 생물축적 현상 및 독성물질의 생태위해성을 예측하기에는 한계가 존재한다. 이러한 외부변화에 따른 오염물질의 생물농축 및 생태계 변화를 정확히 예측할 수 있는 수생태계 모델인 AQUATOX는 2002년 US EPA에서 처음 개발되었으며, 이후 2014년에는 하구역 및 해양 생태계 모듈을 추가한 3.1 버전이 발표되어 하구역 및 해양 생태계도 AQUATOX 모델로 구현할 수 있게 되었다(Zhang et al., 2013; Zhang & Liu, 2014; Lombardo et al., 2014).

생태계의 물질대사(Metabolism)를 예측할 수 있는 중요

한 변수인 총일차생산량(Gross primary production, GPP)과 생태계 호흡량(Ecosystem respiration,  $R_e$ )은 수생태계의 생지화학적 순환에서 중요한 역할을 한다(Staeher et al., 2012). 이에 본 연구에서는 수생태계 예측모델로 널리 사용되고 있는 AQUATOX를 사용하여 낙동강 하구를 정확히 모사할 수 있는 모델을 구축한 후 낙동강 하구역 내에서의 생태계 변화의 중요한 변수인 GPP와  $R_e$ 을 밝히고자 한다. 낙동강 하구역의 물리·화학적 특성과 플랑크톤, 거대조류, 갑각류, 무척추동물, 어류 등의 생태계 현황은 기존 연구 자료를 수집하여 이를 입력변수 및 모델검량 자료로 사용하였다. 초기 모델을 구축한 후 민감도 분석(sensitivity analysis)을 통해 검량하고자 하는 대상에 영향을 많이 주는 페러미터를 순서대로 선정하여 모델검량을 진행하고자 한다. 최종적인 모델검량은 낙동강 하구역에서 측정된 각종 생태계 자료를 이용하여 수행하고, 검량된 모델을 이용하여 GPP와  $R_e$ 을 도출한 후 이 인자들에 영향을 주는 요소들을 밝혀내어 생태계 물질대사와 모델에 사용된 변수들과의 인과관계를 밝히고자 한다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1 낙동강 하구역(Nakdong estuary)

본 연구는 낙동강 하굿둑 아래지점부터 해양과의 경계선인 자연적으로 형성된 모래섬까지를 대상으로 한다(위도 35°03'N~35°06'N; 경도 128°50'E~128°57'E). 본 지역에 대한 구글 위성사진과 물리·화학적 특성은 Fig. 1과 Table 1에 정리하였다. 이 지역의 최대 넓이는 10.5km이고 최대 길이는 6.3km이다. 모델링 대상 지역의 면적은 37.95km<sup>2</sup>이며, 최대 수심은 5m, 평균 수심은 3m이다. 대한민국의 남단에 위치한 곳이라 타 지역에 비해 높은 평균 증발산량, 평균 일사량(light intensity), 평균 온도 값을 보이고 있다. 평균 증발산량은 43.18cm/year이고 평균 일사량과 평균 온도는

Table 1. Site characteristics of hydrological and physicochemical parameters obtained at Nakdong estuary

Hydrological characteristics		Water physicochemical parameters (averaged value)	
Latitude (°)	35.3	pH	8.1
Area (km <sup>2</sup> )	37.95	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	3.8
Maximum length (km)	6.3	DO (mg/L)	8.6
Maximum width (km)	10.5	Salinity (ppt)	16.9
Mean depth (m)	3	BOD (mg/L)	1.6
Maximum depth (m)	5	COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	6.1
Mean evaporation (cm/year)	43.18	TN (mg/L)	1.5
Mean light intensity (Ly/d)	162	TP (mg/L)	0.05
Mean temperature (°C)	15	TSS (mg/L)	13.6



Fig. 1. Photographs showing the modeling sites of Nakdong river estuary (14 red dots represent sampling sites of previous study)

각각 162Ly/day, 15°C이다. Fig. 1에 붉은 점으로 표시된 14개 지점은 낙동강하구 생태계 보전과 관리를 위한 기초자료 확보를 위한 장기모니터링 연구사업 수행 시 설정한 시료채취 지점을 나타내며, 대상 지역의 평균 측정값은 Table 1에 요약하였다(Ye et al., 2019).

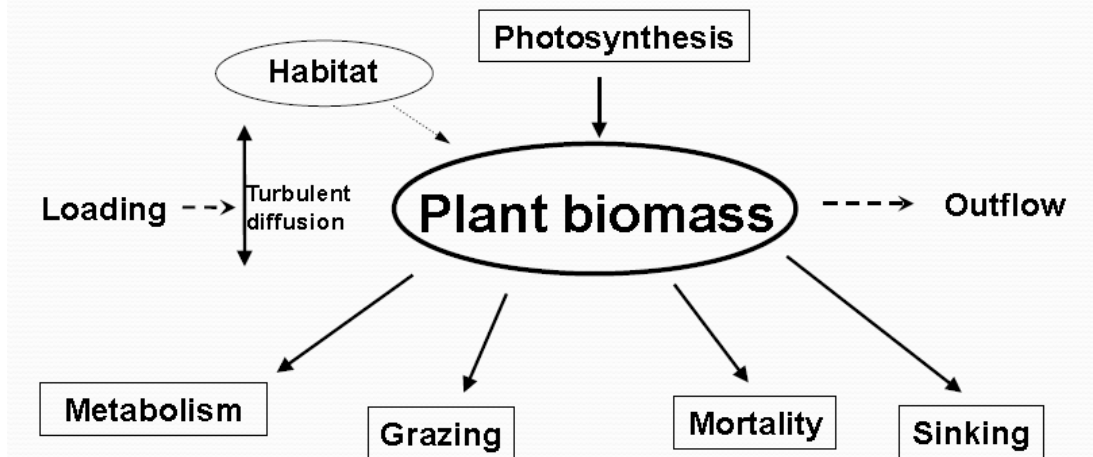
## 2.2 AQUATOX 모델

### 2.2.1 AQUATOX 생태계 모델

AQUATOX 모델은 2002년 미국환경청(USEPA)에 의해

최초 개발된 생태계 모델이며, 영양물질, 부유물질, 점 및 비점오염원, 유입수 수질, 온도, 염분 등의 변동에 따른 수질변동과 수생태계의 변화를 예측하기 위한 목적으로 개발되었다. 2013년 하구역 및 연안 모델을 추가함으로써 그 응용범위가 해양으로까지 확대되었다. AQUATOX는 다양한 환경적 변화로 인해 발생할 수 있는 생태계 변화를 예측 및 평가에 특화되어 있으며, 영양물질(인과 질소)의 증가, 오염물질(유기오염물질)의 유입, 기후변화로 인한 수온상승 및 해수면 상승, 유기물질과 생물체의 분해로 발생하는

# How AQUATOX Models Plants



# Fate and Bioaccumulation in AQUATOX

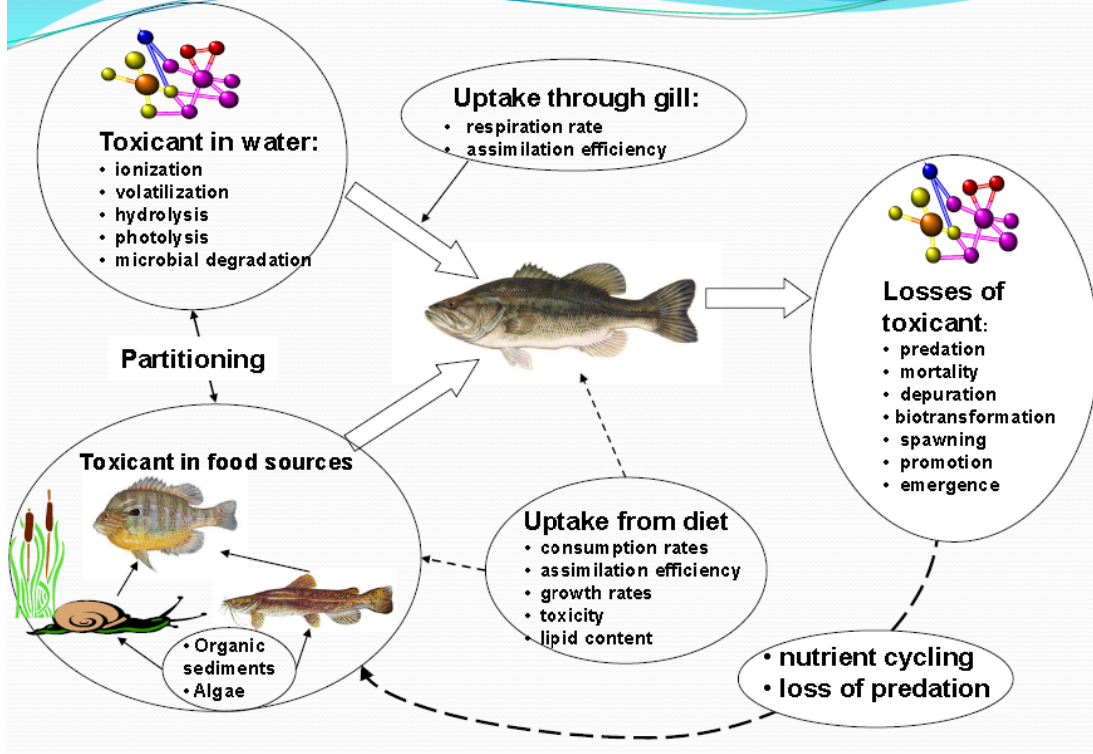


Fig. 2. Conceptual model of ecosystem represented by AQUATOX (US EPA, 2014)

수중 용존산소의 변화, 부유물질 유입으로 인한 광합성 저해현상, 유입수의 유속 증가로 인한 동물 서식처의 변화 등 다양한 생태계 변동을 예측할 수 있다(Fig. 2). 수생태계의 구성요소인 식물성 플랑크톤(phytoplankton, periphyton), 동물성 플랑크톤(zooplankton), 거대조류(macrophytes), 무척추동물(invertebrate), 어류(fish) 등을 먹이망(food web)으

로 구성한 후 각 생물종간의 인과관계를 수치해석 기법을 이용하여 해석한다(Park et al., 2008). AQUATOX 모델 내에서의 식물성 플랑크톤(phytoplankton과 periphyton)의 생체변화량(biomass)은 다음과 같은 Eq. (1)과 Eq. (2)로 표시된다.

$$\begin{aligned} \frac{dBiomass_{phyto}}{dt} = & Loading + Photosynthesis \\ & - Respiration - Excretion - Mortality - Predation \\ & \pm Sinking \pm Floating - Washout - Washin \\ & \pm Diffusion_{seg} + \frac{Slough}{3} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dBiomass_{peri}}{dt} = & Loading + Photosynthesis \\ & - Respiration - Excretion - Mortality - Predation \\ & + Sed_{peri} - Slough \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $dBiomass/dt$  = 식물성플랑크톤과 부착조류의 시간에 따른 생체량 변화( $g/m^3 \cdot d$ 와  $g/m^2 \cdot d$ ); Loading = 식물성 플랑크톤과 부착조류의 경계조건을 통한 유입량( $g/m^3 \cdot d$  and  $g/m^2 \cdot d$ ); Photosynthesis = 광합성률( $g/m^3 \cdot d$  and  $g/m^2 \cdot d$ ); Respiration = 호흡을 통한 생체량 손실( $g/m^3 \cdot d$  and  $g/m^2 \cdot d$ ); Excretion = 배설( $g/m^3 \cdot d$  and  $g/m^2 \cdot d$ ); Mortality = 포식 외의 사망( $g/m^3 \cdot d$  and  $g/m^2 \cdot d$ ); Predation = 포식( $g/m^3 \cdot d$  and  $g/m^2 \cdot d$ ); Washout = 하류 쪽으로의 세척( $g/m^2 \cdot d$ ); Washin = 상류쪽 세척으로 인한 유입(linked segment version only,  $g/m^3 \cdot d$ ); Sinking = 침전으로 인한 손실( $g/m^3 \cdot d$ ); Floating = 식물성 플랑크톤의 표면 부상으로 인한 상층부의 생체량 증가 혹은 하층부의 생체량 감소; TurbDiff = 난류확산( $g/m^3 \cdot d$ ); Diffusion<sub>seg</sub> = 두 모델간의 확산 이송으로 인한 생체량 증가 혹은 감소( $g/m^3 \cdot d$ ); Slough = 세굴로 인한 부착조류의 감소 또는 연계된 식물성 플랑크톤의 생체량 증가; Sed<sub>peri</sub> = 식물성 플랑크톤의 부착조류로의 침전을 의미한다.

다양한 종에 대한 생체량을 계산함에 있어서 빛과 온도는 중요한 역할을 하게 되는데, AQUATOX 내의 빛과 온도에 대한 계산식은 Eq. (3)과 Eq. (4)로 표현된다.

$$\begin{aligned} Solar = & LightMean + \frac{LightRange}{2} \\ & \cdot \sin(0.0174533 \cdot Day - 1.76) \cdot Frac_{Light} Frac_{Light} \\ = & 1.0 - 0.98 \cdot (Canopy) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, Solar = 일평균 광도(ly/d); LightMean = 연 평균 광도(ly/d); LightRange = 광도의 연간 변동범위(ly/d); Day = 경도상 보정된 날짜; Frac<sub>Light</sub> = 사이트의 그늘진 부분; Canopy = 나무에 의해 그늘진 부분을 의미한다.

$$\begin{aligned} Temperature = & TempMean + (-1.0 \cdot \frac{TempRange}{2} \\ & \cdot (\sin(0.0174 \cdot (0.987 \cdot (Day + Phaseshift) - 30))) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, Temperature = 일평균 수온(deg. C); TempMean = 연 평균 수온(deg.C); TempRange = 연간 수온 변동 범위 annual(deg.C); Day = day of year(d); PhaseShift = time lag in heating(= 90 d)을 의미한다.

## 2.2.2 총일차생산량(gross primary production, GPP)과 생물체 호흡량(ecosystem respiration, Re)

GPP는 생태계 내에서 독립영양생물(autotroph)이 일정 시간동안 무기물(inorganic carbon)로부터 생산한 유기물의 양을 의미한다. 주로 광합성이 여기에 기여하지만, 빛이 들지 않는 심해 저생대등의 생태계에서는 화학합성이 유일한 독립영양 방식이다. Re는 종속영양생물(heterotroph)이나 독립영양생물(autotroph)에 의해 유기탄소를 산화작용에 의해 무기탄소로 전환하는 것을 의미한다. 순수생태계생산량(net ecosystem production, Pn)은 GPP와 Re의 차로 계산이 된다. Pn의 값이 (+)인 경우는 동화작용(anabolic process)이 (-)인 경우는 분해 작용(catabolic process)이 주로 생태계 내에서 일어난다고 볼 수 있다.

## 2.2.3 AQUATOX에 사용된 변수(parameters)

생산자(producers)에 속하는 플랑크톤(식물성 플랑크톤 및 부착조류)의 초기 생체량은 기존 조사연구사업 결과 값을 사용하였고, 소비자(consumers)에 속하는 동물성 플랑크톤, 저서무척추동물, 어류의 초기 값은 AQUATOX 모델 내에 내장된 spin-up 기능을 사용하여 산정하였다(Park et al., 2016; Yoo et al., 2016). Spin-up 기능은 초기 모델의 생체량 입력 값을 default 값으로 입력한 후 모델을 구동하여 얻은 최종 값을 다시 모델의 초기 생체량으로 할당하는 방법이다. 식물성 플랑크톤(돌말류, 녹조류, 남조류, 은편모조류), 부착조류(해양 돌말류)의 AQUATOX 입력변수(초기 생체량, 빛포화수준, 최적온도, 최대광합성량, 호흡률, 폐사율, 침전을 등)들은 Table 2에 정리하였다. 동물성 플랑크톤(요각류, 윤형동물), 저서거대무척추동물(게, 새우) 및 물고기(달고기, 황아귀)에 대한 AQUATOX 입력변수들은 Table 3에 정리하였다. Table 2와 Table 3에 표시된 구동변수들은 AQUATOX library에서 제공하는 값들이며, 이들 초기 생체량은 모델을 처음 구동한 후 spin-up 기능을 사용하여 평형상태의 최적 생체량을 구한 후 이 값을 다시 초기 생체량으로 대체하였다.

## 2.2.4 민감도 분석(sensitivity analysis)

AQUATOX 모델에는 상태변수(state variable)와 구동변수(driving variable)들이 사용이 되는데, 이들 상태 및 구동

Table 2. List of species and state parameters used for phytoplankton and periphyton populations

Population	Phytoplankton				Periphyton
	Diatom	Green	Blue-green	Cryptomonas	Diatom, Marine
B <sub>0</sub>	0.023	0.027	0.035	0.038	0.0003
L <sub>s</sub> (Ly/d)	62	54	60	50	22.5
K <sub>P</sub> (mg/L)	0.06	0.05	0.03	0.05	0.055
K <sub>N</sub> (mg/L)	0.39	0.01	0.4	0.03	0.117
T <sub>RS</sub>	1.8	2	2	2	1.8
T <sub>0</sub> (°C)	20	25	27	12	20
P <sub>m</sub> (d <sup>-1</sup> )	3.4	3.6	2.2	3.5	2.06
R <sub>resp</sub> (d <sup>-1</sup> )	0.08	0.03	0.05	0.026	0.026
M <sub>c</sub> (d <sup>-1</sup> )	0.01	0	0	0.01	0.001
L <sub>c</sub> (m <sup>-1</sup> )	0.14	0.14	0.09	0.144	0.03
W/D	10	5	5	5	5

B<sub>0</sub>: initial biomass, mg/l for phytoplankton and g/m<sup>2</sup> for periphyton and macrophyte; L<sub>s</sub>: light saturation level for photosynthesis; K<sub>p</sub>: half-saturation constant for phosphorus; K<sub>N</sub>: half-saturation constant for nitrogen; T<sub>RS</sub>: temperature response slope, unitless; T<sub>0</sub>: optimal temperature; P<sub>m</sub>: maximum photosynthetic rate; R<sub>resp</sub>: respiration rate; M<sub>c</sub>: mortality coefficient; L<sub>c</sub>: light extinction; R<sub>sink</sub>: sinking rate; W/D: wet and dry weight ratio

Table 3. List of species and state parameters used for zooplankton, benthic macroinvertebrate and fish populations (Croaker and Toadfish)

Population	Zooplankton		Benthic macroinvertebrate		Fish	
	Copepod	Rotifer	Shrimp	Crab	Croaker	Toadfish
B <sub>0</sub>	0.0013	0.0001	2.31	0.43	0.26	1.05
H <sub>s</sub>	1	1	0.05	0.5	1	0.2
C <sub>m</sub> (g/g d)	1.8	3.44	0.18	0.098	0.075	0.33
P <sub>min</sub> (mg/L)	0.25	0.6	0.05	0.1	0.05	0.5
T <sub>0</sub> (°C)	26	25	28	34	25	30
R <sub>resp</sub> (d <sup>-1</sup> )	0.01	0.34	0.019	0.008	0.005	0.002
C <sub>c</sub>	8	2.5	20	10	10	4
M <sub>c</sub> (d <sup>-1</sup> )	0.027	0.1	0.002	0.001	0.0012	0.012
L <sub>f</sub>	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07
W/D	5	5	5	5	5	5

B<sub>0</sub>: initial biomass, mg/l for zooplankton and fish and mg/m<sup>2</sup> for benthic animal; H<sub>s</sub>: half-saturation feeding, mg/l for zooplankton and fish and g/m<sup>2</sup> for benthic animal; C<sub>m</sub>: maximum consumption rate; P<sub>min</sub>: minimum prey for feeding; T<sub>0</sub>: optimal temperature; R<sub>resp</sub>: endogenous respiration rate; C<sub>c</sub>: carrying capacity, mg/l for zooplankton and fish and g/m<sup>2</sup> for benthic animal; M<sub>c</sub>: mortality coefficient; L<sub>f</sub>: initial lipid fraction; W/D: wet and dry weight ratio

변수들이 목표로 하는 결과 값(본 연구의 경우 클로로필-a)에 어느 정도 영향을 미치는 지를 정량적으로 해석하는 방법이 민감도 분석이다. 민감도 분석을 통해 클로로필-a의 농도에 영향을 주는 입력변수들을 토네이도 도표형태로 가장 영향력이 큰 순서대로 나열한다. 검량과정에서는 가장 영향력이 큰 변수들 위주로 값을 변경하여 측정값에 모델 값을 맞추게 된다. 민감도 분석에서는 AQUATOX에 내장된 nominal range 민감도 분석 툴을 이용하여 영향을 미칠 것으로 예상되는 모든 입력변수들을 지정한 후 대상 목표(예: 클로로필-a)를 최종 선택한 후 민감도 분석을 수행한다. 민감도 값은 Eq. (5)에 따라 계산한다.

Sensitivity =

$$\frac{|Result_{Pos} - Result_{bas}| + |Result_{Ng} - Result_{bas}|}{2 \times |Result_{baseline}|} \cdot \frac{100}{PctChanged} \quad (5)$$

여기서, 민감도(sensitivity) = 정규화된 민감도 통계(normalized sensitivity statistic)(%), Result<sub>scenario</sub> = 입력변수의 변화가 없을 경우(baseline), + 변화인 경우(Pos), - 변화인 경우(Ng)에 대한 AQUATOX의 평균값; PctChanged = 입력변수의 + 변화 혹은 - 변화일 경우의 입력변수의 변화량(%)을 의미한다.

민감도 분석에서는 AQUATOX 모델에 민감도 분석을 할

입력변수 값을  $\pm 10\%$  변화시켜서 결과값(클로로필-a, GPP, Re)에 주는 영향을 밝혀내는데, 생산자(식물성 플랑크톤 및 부착조류), 소비자(동물성 플랑크톤, 저서무척추동물, 어류) 그리고 지역 특성 및 수질과 관련된 변수(온도, pH, 빛, 바람, 하구역 체적, 질소, 인, 부유물질 등) 형식으로 Table 4에 요약하였다.

### 2.2.5 모델 검량(calibration) 및 검증(validation)

구축된 낙동강 하구역 AQUATOX 모델에 대한 검량은 낙동강 하구역에서 측정된 클로로필-a 농도를 이용하여 수행하였다. 모델 검량에 앞서 민감도 분석을 통해 클로로필-a에 영향을 주는 변수들을 선정한 후 이들 영향력이 큰 변수들을 변화시켜 측정된 클로로필-a값과의 일치여부 및 통계분석을 통해 검량의 정확도를 측정하였다. AQUATOX 모델 검량에 사용된 변수들은 Table 4에 요약하였다. 검량은 클로로필-a에 대해 수행이 되었으며, 동물성 플랑크톤, 저서거대무척추동물, 물고기의 경우에는 해당 지역의 측정값이 없거나 충분치 않아 정량적 평가 대신 정성적 평가만 하였다.

Root mean square error(RMSE)와 mean absolute error(MAE)는 모델검량에 많이 사용되는 통계 기법이므로 본 모델 검량의 정확도 평가에 사용되었으며, 아래 Eq. (6)과 Eq. (7)로 표시된다.

$$\text{Root Mean Square Error} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_i} (O_i - P_i)^2} \quad (6)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (7)$$

여기서,  $O_i$ 는 측정값,  $P_i$ 는 모델 값을 나타낸다. RMSE와

MAE의 값이 0에 가까울수록 모델값과 측정값과의 일치도가 증가함을 나타낸다.

추가로 모델 검량의 정확도 평가를 위해 상대편향도(relative bias) 기법을 이용했으며 아래와 같이 표현된다(Gu et al., 2013; Lee & Ahn, 2012).

$$rB = (\text{Pred}_{\text{Bar}} - \text{Obs}_{\text{Bar}}) / S_{\text{Obs}} \quad (8)$$

여기서,  $rB$ 는 상대편향도(표준편차 단위),  $\text{Pred}_{\text{Bar}}$ 는 모델 값의 평균값,  $\text{Obs}_{\text{Bar}}$ 는 관측값의 평균값 그리고  $S_{\text{Obs}}$ 는 관측값의 표준편차를 의미한다. 다음은 F-test를 이용하여 검량의 정확도를 예측하는 것으로 모델 값의 분산과 측정값의 분산의 비를 나타낸다. F-test 값이 1이라는 것은 모델 값과 측정값의 분산비가 1이라는 것을 나타내며, F-test는 다음과 같이 Eq. (9)로 표현된다.

$$F = \frac{(\text{Var}_{\text{pred}})}{\text{Var}_{\text{Obs}}} \quad (9)$$

여기서,  $\text{Var}_{\text{pred}}$ 는 모델 값의 분산,  $\text{Var}_{\text{Obs}}$ 는 측정값의 분산을 의미한다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 클로로필-a에 대한 민감도 분석

민감도 분석 결과는 Fig. 3에 토네이도 도표(tornado diagram)로 표시하였다. 토네이도 도표에서 푸른색 바는 해당 변수를 +10% 증가시켰을 때 클로로필-a의 증감을 의미하고, 붉은색 바는 해당 변수를 -10% 감소시켰을 때 클로로필-a의

Table 4. List of parameters for producers, consumers and driving variables that have been used in AQUATOX model calibration and sensitivity analysis

Producers (units)	Consumers (unit)	Driving variables (unit)
Saturating light (Ly/d)	Half saturation feeding (mg/L)	Temperature (°C)
P half saturation (mg/L)	Maximum consumption (g/g d)	pH
N half saturation (mg/L)	Temperature response slope	Light (Ly/d)
Temperature response slope	Optimal temperature (°C)	Wind (m/s)
Optimal temperature (°C)	Maximum temperature (°C)	Water Volume (m <sup>3</sup> )
Maximum photosynthetic rate (1/d)	Endogenous respiration (1/d)	TN, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , TP
Photorespiration coefficient (1/d)	Excretion: Respiration	CO <sub>2</sub> , DO, TSS, COD, Salinity, Detritus
Respiration rate at 20°C (g/g d)	Gamete mortality (1/d)	
Mortality coefficient (g/g d)	Mortality coefficient (/d)	
Exponential mortality coefficient (g/g d)	Carrying capacity (g/sq m)	
Light extinction (1/m-g/m <sup>3</sup> )	Mean wet weight	

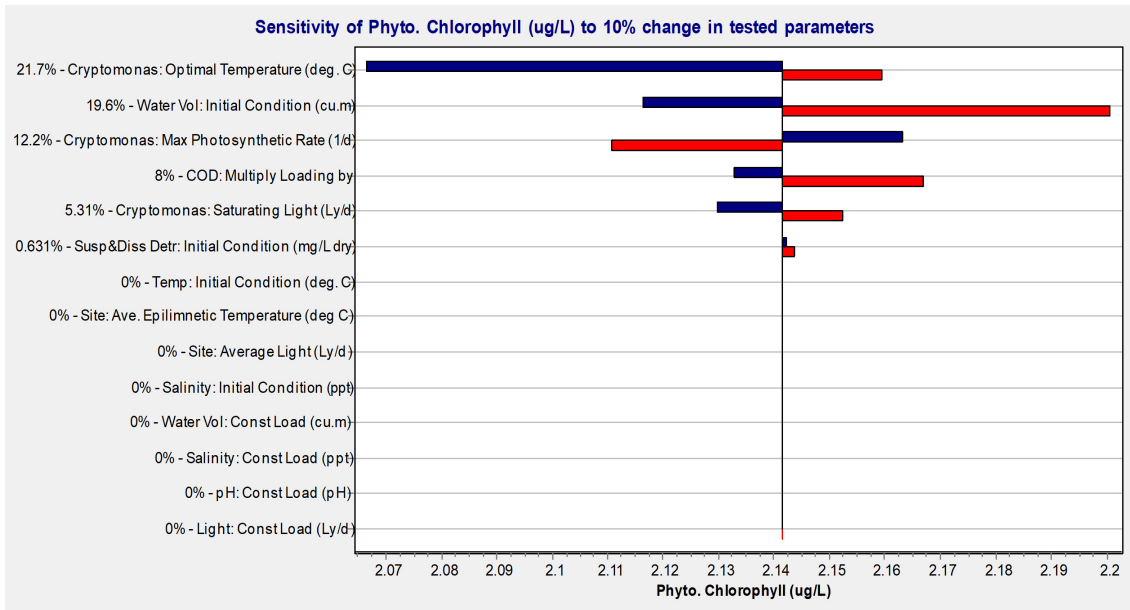


Fig. 3. Sensitivity of Chlorophyll-a to 10% change in tested parameters in Nakdong estuary. The black vertical line at the middle of the diagram represents the baseline model result in which no sensitivity test was conducted

증감을 나타낸다. 민감도 값이 100%라는 것은 해당 변수를 10% 변화시켰을 때 클로로필-a의 농도도 10% 변화하는 것을 의미하므로, 민감도 값이 크다는 것은 해당 변수가 클로로필-a의 농도에 미치는 영향이 상대적으로 크다는 것을 의미한다. 민감도 분석은 Table 4에 표시한 물리적 특성(수온, pH, 빛, 바람, 유입수량), 영양물질(COD, 부유 및 용존 유기물, TSS, 질소, 인, 염분) 그리고 생물체 관련 변수에 대해 동시에 분석을 수행하였다.

은편모조류(*Cryptomonas*)의 최적 온도가 민감도 21.7%로 클로로필-a의 농도에 가장 크게 영향을 주는 것으로 나타났다. 최적 온도가 감소되면 클로로필-a의 농도가 증가하고 최적 온도가 증가하면 클로로필-a의 농도가 감소하였다. 하구역의 초기 물의 체적이 민감도 19.6%로 두 번째로 영향력이 큰 변수로 나타났다. 물의 체적의 경우에도 체적이 감소하면 클로로필-a의 농도가 증가하고 체적이 증가하면 클로로필-a의 농도가 감소하였다. 세 번째로 영향력이 큰 변수는 은편모조류의 최대 광합성률로 민감도는 12.2%였다. 이 경우에는는 최대 광합성률이 증가하면 클로로필-a의 농도가 증가하였다. 다음으로 영향력이 큰 변수는 COD 유입과 은편모조류의 saturating light로 민감도는 각각 8%와 5.31%였다. 민감도 분석을 통해 은편모조류와 관련된 변수들이 클로로필-a 농도에 미치는 영향이 크다는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2 모델 검량 및 검증

민감도 분석 결과에 따라 클로로필-a에 영향을 주는 변수

들 위주로 값을 변화시켜 모델 검량을 수행하였으며 클로로필-a의 모델 값과 측정값을 Fig. 4에 표시하였다. 대부분의 모델 값은 측정데이터와 일치하였으나 2019년 8월의 모델 값은 데이터 값보다 적은 것으로 나타났다. 클로로필-a에 대한 검량의 통계 값은 0.029(RB), 1.35(F), 0.489(RMSE) 그리고 0.107(MAE)였다. 클로로필-a에 대한 검량이 끝난 후 DO, TN, TP 측정값에 대해 모델 값과 비교를 하였으며 이는 검량된 모델의 검증과정으로 볼 수 있다. DO, TN, TP 측정값과 모델 값은 Fig. 5에 표시하였다. 모델 값과 측정값과의 정확성을 판별하기 위한 통계 값들은 Table 5에 정리하였다. RB 값은 0.018-0.365, F 값은 0.65-1.76, RMSE 값은 0.018-1.134 그리고 MAE 값은 0.003-1.143의 범위를 보여주었고, TN의 경우는 DO, TP에 비해 검량 정확도가 낮은 것으로 나타났다.

갑각류와 어류에 대한 모델 값과 측정값은 Fig. 6에 나타내었다. 갑각류인 게와 새우에 대한 모델 결과 값은 Fig. 6(a)에 표시하였는데, 게의 경우 초기에 높은 값을 가졌으나 이후 점차 감소하는 경향을 보였고 새우의 경우에는 계절적 변동이 심한 것으로 나타났다. 기존 연구에 따르면 낙동강 하구역에 서식하는 게의 우점종은 점박이꽃게(*Portunus sanguinolentus*)이며, 하구역의 게의 생체량은 겨울에는  $0.04\text{g/m}^2$ 으로 가장 낮았으며 여름에는  $0.145\text{g/m}^2$ 으로 가장 높았다(Lee et al., 2009; Lee et al., 2012). 새우의 경우에는 그라비새우(*Palaemon gravieri*), 꽃새우(*Trachysalambria curvirostris*), 남방도화새우(*Pandalus gracilis*)가 우점종이었으며, 게와 동일하게 겨울에  $2.0 \times 10^{-6}\text{mg/L}$ 로 생체량이 가장 낮았으며 여름에는  $2.0 \times 10^{-5}$



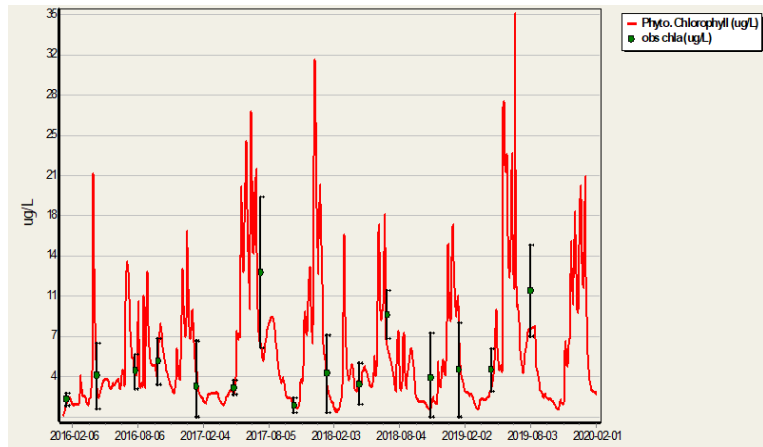


Fig. 4. Observed (symbols) and calibrated AQUATOX simulations (lines) of chlorophyll-a

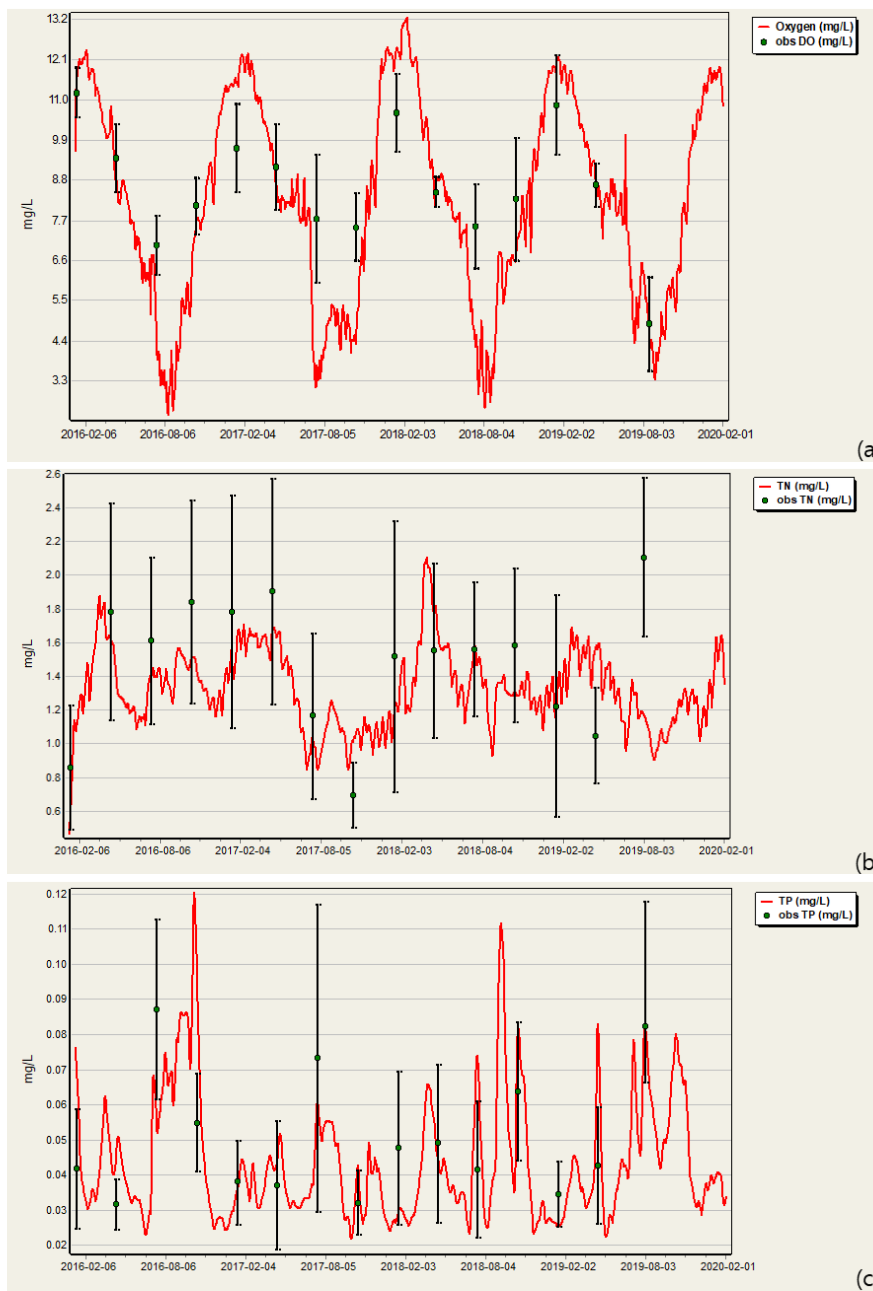


Fig. 5. Validation results of calibrated AQUATOX simulations for (a) DO, (b) TN and (c) TP

Table 5. Values of the goodness-of-fit criteria computed for the simulated variable during the calibration phase and variables during the verification phase

Variables		RB	F	RSME	MAE
Calibration	Chlorophyll-a	0.029	1.35	0.489	0.107
Verification	TN	0.365	0.65	0.363	0.143
	TP	0.176	1.21	0.018	0.003
	DO	0.018	1.76	1.134	0.029

mg/L로 가장 높은 생체량 값을 나타내었다. Fig. 6(a)에 포함된 관측값은 동일한 지역이기는 하나 2009년 측정데이터임을 감안하여 정량적 검증은 어렵기 때문에 정성적 검증차원에서 결과를 해석하고자 한다. 측정데이터는 2009년 이후 데이터를 2016년과 2018년 데이터로 계절에 맞추어 그림에 삽입하였다.

낙동강 하구역에 서식하는 우점어류에 대한 조사(2007년 3월, 2010년 3월, 7월, 10월)를 통해 달고기(*Zeus faber*)와 황아귀(*Lophius litulon*)가 우점종으로 확인되었다(Lee et al., 2009, Lee et al., 2012). 2012년의 연구는 본 연구지역보다 남쪽으로 4km 떨어진 지점에서 수행되었기 때문에 본 연구

와 직접 비교는 할 수 없지만 근접한 지역이기 때문에 본 연구결과와 정성적으로 비교해 보았다. 따라서, 2007년 자료는 2016년, 2010년은 2019년 자료로 가정하여 Fig. 6(b)에 삽입하였다. 비록 시기와 대상 지역이 차이가 나지만 측정치와 모델 값이 상당히 일치하는 것을 확인하였다. 참고로 전어(shad)를 모델에 포함시켰으나 지속적으로 감소하는 양상을 보여 낙동강 하구역은 전어의 서식처로 적합하지 않음을 알 수 있었다.

### 3.3 총일차생산량(gross primary production, GPP)과 생물체 호흡량(ecosystem respiration, Re)

#### 3.3.1 총일차생산량(GPP)과 호흡량(Re)의 변화

낙동강 하구역의 GPP와 Re는 시기별로 편차가 큰 것으로 밝혀졌다(Fig. 7). GPP가 증가하는 기간에는 Re가 감소하는 경향을 보이고 있었다. Fig. 5의 용존산소 결과와 비교하면 GPP가 증가할 때 용존산소의 농도가 증가하였으며, Re가 증가할 경우에는 용존산소의 농도가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 낙동강 하구역의 평균 GPP는  $0.195 \text{ gO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이었으며 평균 Re는  $0.5 \text{ gO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 평균 Pn은

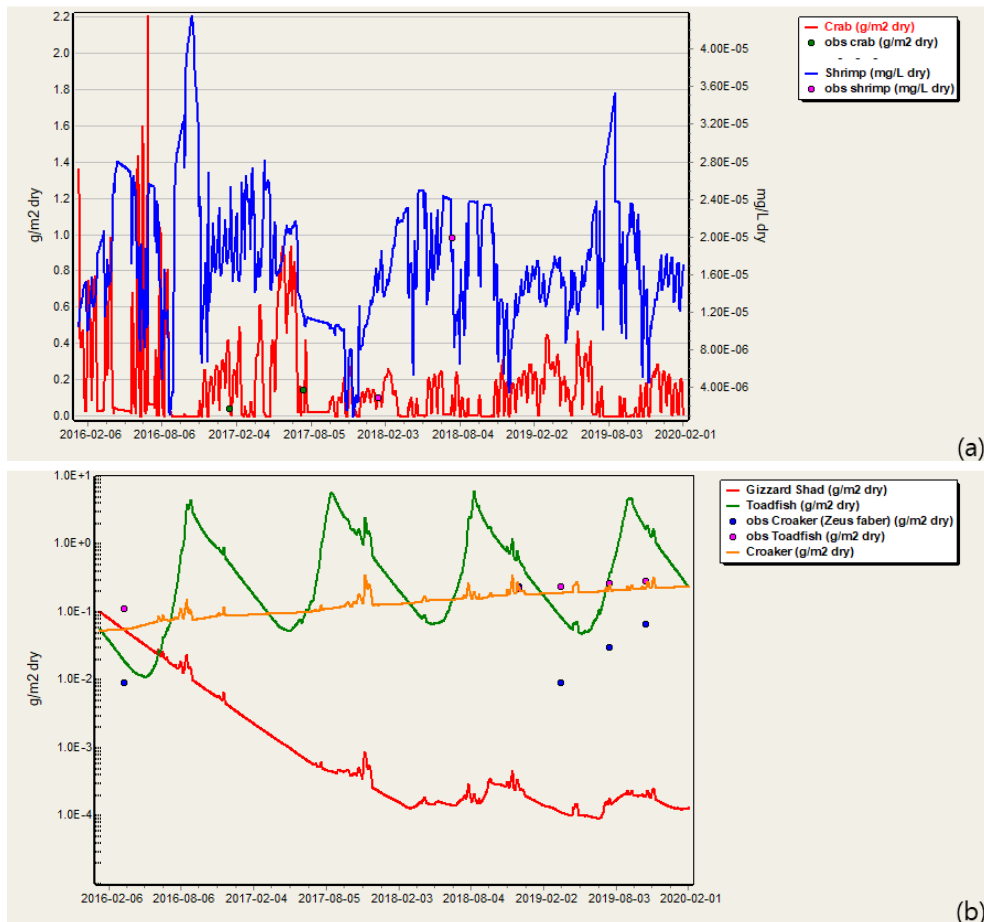


Fig. 6. Validation results of calibrated AQUATOX simulations for (a) crab and shrimp and (b) fishes

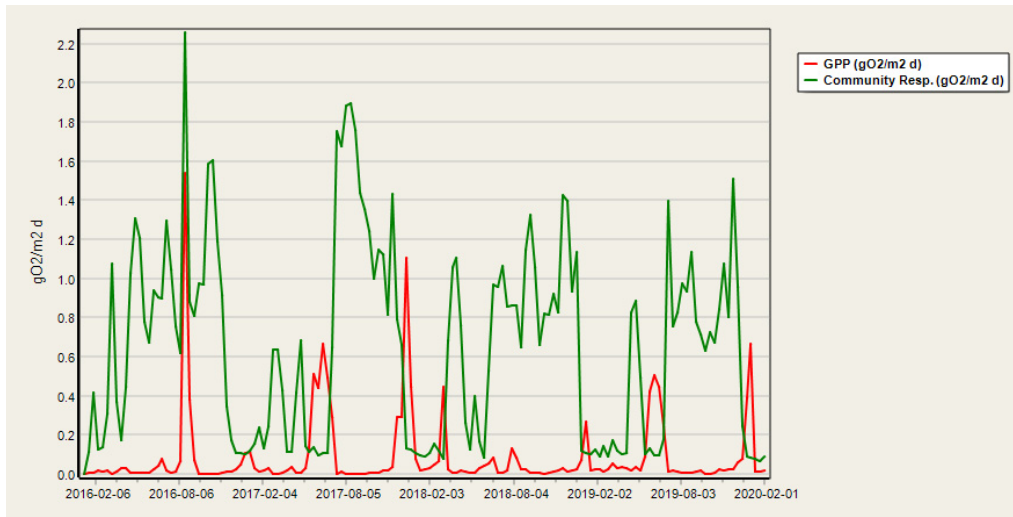


Fig. 7. Calibrated AQUATOX simulations of gross production and community respiration in Nakdong estuary

Table 6. Mean values of GPP, Re and Pn in estuarine ecosystem in the world (unit:  $gO_2 m^{-2} d^{-1}$ )

Estuary	GPP	Re	Pn	Reference
Haihe river, China	4.503	-	-	Zhu et al. (1993)
Bohai bay, China	0.269	-	-	Wei et al. (2003)
Florida coast, USA	0.2080	0.621	1.562	Hitchcock et al. (2010)
Apalachicola bay, USA	3.410	4.520	-1.512	Caffrey (2003)
Monterey bay, USA	-	4.500	1.580	Nidzeiko et al. (2014)
Douro estuary, Portuguesa	0.854	3.081	-	Azevedo et al. (2006)
Haihe estuary, China	0.408	0.351	0.157	Yan et al. (2018)
Yellow river estuary, China	2.550	2.990	-0.510	Shen et al. (2015)
Yangtze river estuary, China	0.719	-	-0.553	Gong et al. (2015)
Pearl river estuary, China	1.363	-	-	Jiang et al. (2010)
Nakdong estuary, Korea	0.195	0.560	-0.365	In this study

-0.365 $gO_2 m^{-2}d^{-1}$ 이었다. 다른 나라의 하구역에 대한 GPP와 Re는 Table 6에 나타내었다. 기존 연구와 비교 시 낙동강 하구역의 GPP가 가장 낮았고 Re도 중국의 Haihe 하구역 값을 제외하고는 제일 낮은 값을 보여주었다. 이는 Haihe 하구역(38.9°N)을 제외하고는 모든 대상 지역들의 위도가 낙동강 하구역보다 낮은 지역이라 온도와 일조량이 풍부하여 GPP와 Re가 낙동강 하구역보다 큰 것으로 판단된다.

낙동강 하구역의 Pn은 일부 기간을 제외하고는 모두 음의 Pn 값을 보여주었는데, 이는 수생태계가 종속영양생물이 우점종인 것을 의미한다. 양의 Pn은 일차생산자(주로 플랑크톤)의 광합성 작용에 의해 GPP가 Re보다 큰 것을 의미한다. GPP는 식물성플랑크톤의 개체수가 증가하는 여름에 높게 나타나는데 본 연구결과는 계절과는 상관없이 불규칙하게 GPP가 증가하는 것으로 나타났다. 이에 대한 원인을 찾기 위해 GPP와 Re에 영향을 주는 변수들에 대한 민감도 분석을 수행하였고 Fig. 8에 표시하였다.

GPP에 가장 큰 영향을 주는 요소는 물의 체적(민감도: 127%)이었으며, 다음은 빛의 세기(95%)였다. 은편모조류의 변수들 중에는 최대광합성율(56.1%)이 가장 영향을 많이 주었으며, 최적온도(44.6%), 온도반응구배(35.3%) 순으로 영향을 주었다. 최대광합성율의 경우 이 값을 증가시킬 때 GPP가 증가하였으나, 최적온도와 온도반응구배의 경우에는 감소시킬 때 GPP가 증가하였다. Re에 가장 큰 영향을 주는 요소는 온도(78.4%), 물의 체적(75%), 지역의 최대 수심(6.5%)이었다. 온도와 물의 체적의 경우 이 값들을 증가시킬 경우 Re는 증가하였으나, 지역의 최대 수심의 경우에는 이 값을 증가 혹은 감소시키는 모든 경우에도 Re는 증가하였다. 기존의 연구에서는 GPP에 가장 큰 영향을 주는 요소는 식물성플랑크톤과 관련된 변수들이었으나 본 연구의 경우에는 물의 체적이 가장 큰 영향요소였다(Cai et al., 2013; Yan et al., 2018).

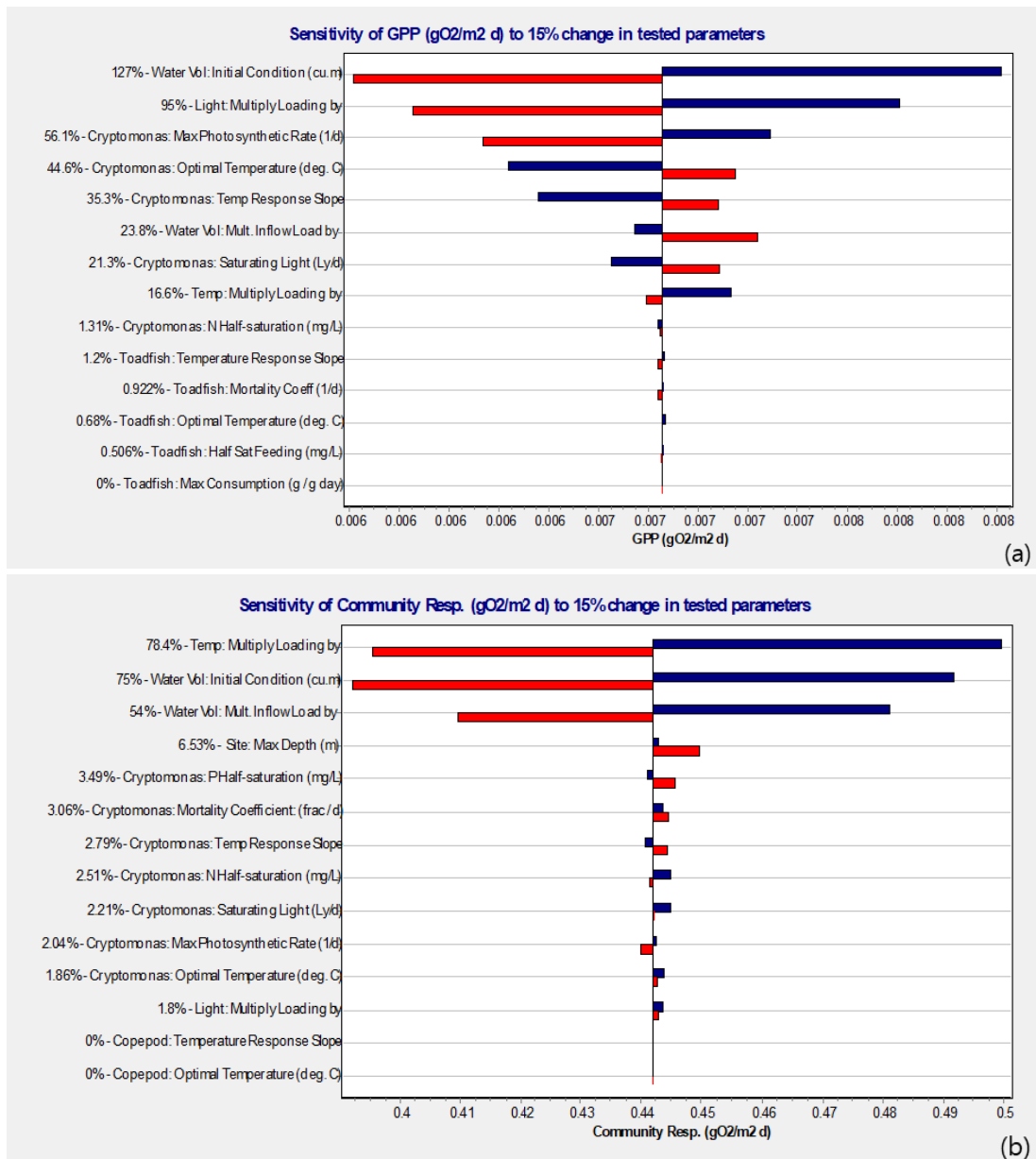


Fig. 8. Sensitivity of GPP and Re to 15% change in tested parameters in Nakdong estuary. The black vertical line at the middle of the diagram represents baseline model result in which no sensitivity test was conducted

### 3.3.2 방류량 및 방류시기의 영향

낙동강 하구역은 Table 6에 표시한 다른 하구역과는 다른 특성을 지니고 있는데, 본 연구지역은 낙동강 하굿둑을 통해 주기적으로 담수를 하구역으로 방류를 하는 특성이 있다. 담수의 유입은 하구역 생태계에 많은 영향을 줄 것으로 예상되며, 특히 상류로부터의 영양물질, 부유물질, 녹조유입 그리고 염분의 변화에 따른 플랑크톤의 변화가 예상된다.

GPP와 Re의 방류수 유입으로 인한 변화양상은 Fig. 9(a)에 나타내었다. 2016년 7월, 2017년 7-8월, 2018년 9월, 2019년 6월에 방류수 유입이 급격히 늘어난 것을 확인할 수 있으며, 이 기간의 GPP는 0에 수렴하였다. 반면에 Re는 급격

히 증가하는 것을 알 수 있다. GPP가 최소가 된다는 것은 식물성 플랑크톤의 광합성 활동이 급격히 감소가 되는 것을 의미하는데, 이는 Fig. 9(b)를 통해 확인할 수가 있다. 방류수량이 증가하는 시기에는 방류수에 포함된 담수 플랑크톤(규조류, 녹조류, 남조류)의 유입이 있지만 하구역에서 우점종으로 서식하는 은편모조류는 방류수에 의해 모두 유실이 되는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 방류수량이 최소로 유지되는 기간에는 은편모조류가 우점종으로 개체수가 증가하는 것을 확인할 수 있고 이 기간에는 GPP도 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 방류수가 최소로 유지되는 기간 동안에는 은편모조류(Cryptomonas)가 우점종이었으며 다음으로 녹조류(Greens), 돌말류(Diatoms), 남조류(Blue-greens)

그리고 와편모류(Dinoflagellate) 순이었다. 이들 플랑크톤은 지속적인 성장이 아닌 피크형태로 특정 기간 동안 펄스형태로 성장이 되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 하굿둑 방류로 인한 염분변화와 방류수에 포함된 담수 플랑크톤의 유입 때문으로 알려져 있다(Yoo et al., 2016). 2013년부터 2015년까지의 낙동강 하구역 연구에 따르면 하굿둑에 가까운 곳에서는 낮은 염분으로 인해 담수 돌말류인 *Stephanodiscus* spp.와 *Synedra acus*가 출현하였고, 염분이 높은 하구에서는(본 연구지역 남쪽 5km 지점) *Prorocentrum donghaiense*, *Gymnodinium* spp. *Cochlodinium polykrikoides*와 같은 와편모류가 주로 출현한 것으로 보고되었다(Yoo et al., 2016). 하굿둑 방류량이 많은 시기에는 은편모조류의 농도는 급격히 줄었는데 이는 유입수의 증가로 인한 은편모조류의 해양

으로의 유실로 판단되며, 반면 녹조류, 돌말류, 남조류의 농도가 증가하였는데 이는 하굿둑 내측의 낙동강 담수에 서식하는 플랑크톤의 유입이 있었기 때문이다(Park et al., 2016; Yoo et al., 2016). 2016년 3월부터 5월까지 기간에는 하굿둑 방류량이 많았고 이때 플랑크톤의 구성비는 녹조류 51%, 돌말류 31% 그리고 은편모조류는 0%였다. 2016년 6월에는 방류량이 최소였고 이때의 은편모조류는 전체 구성의 92%였고 나머지 플랑크톤의 구성비는 8% 이하였다(Fig. 9(b)). 따라서 은편모조류는 낙동강 하구역에서 발생하여 성장하는 플랑크톤으로 광합성 작용을 하여 GPP에 영향을 주고 나머지 플랑크톤(녹조류, 돌말류, 남조류)은 하굿둑 방류수를 통해 하구역으로 유입이 되었고 GPP에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다.

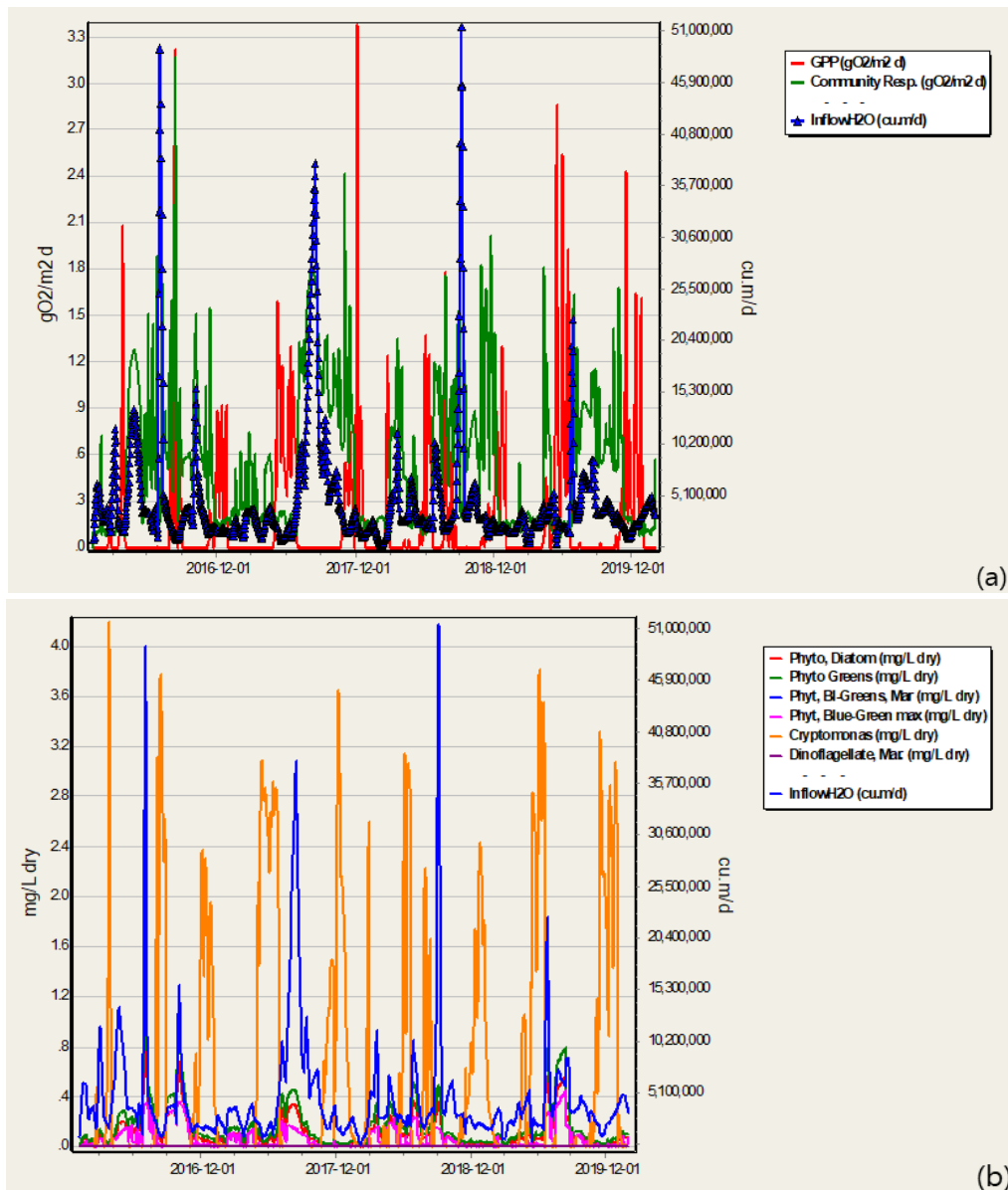


Fig. 9. Simulation results of effect of inflow water on Nakdong estuary for (a) variations of gross primary production and community respiration and (b) phytoplankton species

## 4. 결 론

낙동강 하구역의 생태계를 모사할 수 있는 AQUATOX 모델을 구축하였고 기존 측정 자료를 이용하여 검량 및 검증 수행하였다. 검량된 모델을 이용하여 낙동강 하구역의 GPP와 Re를 산정하여 하구역 생태계 현황을 분석하고자 하였다. GPP와 Re는 해외 여러 나라의 하구역과 비교하였을 때 모두 낮은 값을 나타내었고, Pn은 음의 값을 나타내어 식물성플랑크톤에 의한 광합성은 타 지역과 비교 시 낮은 것으로 판단되었다.

GPP와 Re는 계절에 따라 값의 차이를 보이는 것이 일반적이나 낙동강 하구역의 GPP와 Re는 하굿둑 방류수의 양에 크게 영향을 받았다. 방류수량이 증가할 때 하구역 내의 우점종인 외편모조류의 유실로 GPP는 0에 수렴하였고 반면에 Re는 크게 증가하는 양상을 보였다. GPP가 감소한다는 것은 광합성에 의한 이산화탄소의 유기물로의 변환이 감소하고 동시에 발생하는 산소의 양이 감소하는 것을 의미하고 Re가 증가한다는 것은 산화작용에 의해 유기탄소의 이산화탄소로의 전환이 증가하고 동시에 용존산소를 소모하는 것을 의미한다.

유입수량의 증가는 유입수에 포함된 유기물질의 유입이 증가함을 의미하고 이 유기물질은 산화작용에 의해 분해되면서 용존산소를 감소시키는 것으로 판단된다. 또한 많은 양의 담수 유입으로 인해 하구역에 서식하는 식물성 플랑크톤을 해양으로 유출시켜 광합성에 의해 발생하는 산소의 양을 줄이는 결과를 가져왔다고 판단된다. 이로 인해 낙동강 하구역은 다른 나라 하구역에 비해 GPP가 상대적으로 적었고 Re는 GPP 보다 커서 Pn은 음의 값을 나타내었다. 따라서 유기물질이 함유된 낙동강수의 방류는 하구역 생태계 중 식물성 플랑크톤의 개체수에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2019년)에 의하여 연구되었습니다.

## References

1. Azevedo, I., Duarte, P. and Bordalo, A. (2008), Understanding spatial and temporal dynamics of key environmental characteristics in a mesotidal Atlantic estuary (Douro, NW Portugal), *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 76, No. 8, pp. 620~633.
2. Cai, L., Zhu, G. and Li, X. (2013), Characteristics of phytoplankton primary productivity and influencing factors in littoral zone of lake Taihu, *Acta. Ecol. Sin.*, Vol. 33, No. 9, pp. 7250~7258.
3. Caffrey, J. (2003), Production, respiration and net ecosystem metabolism in U.S. estuaries, *Environ. Monit. Assess.*, Vol. 81, No. 4, pp. 207~219.
4. Gong, X., Zhang, X. and Gui, Z. (2015), Seasonal changes of chlorophyll a and primary productivity in Jiuduansha Wetland, *J. Shanghai Ocean Univ.*, Vol. 24, No. 8, pp. 544~549.
5. Gu, Z., Wu, M., Li, K. and Ning, P. (2013), Variation of heavy metal speciation during the pyrolysis of sediment collected from Dianchi lake, China, *Arab. J. Chem.*, Vol. 10, No. 4, pp. S2196~S2204.
6. Hitchcock, G., Kirkpatrick, G., Minnett, P. and Palubok, V. (2010), Net community production and dark community respiration in a *Karenia brevis* (Davis) bloom in West Florida coastal waters, USA, *Harmful Algae*, Vol. 9, No. 4, pp. 351~358.
7. Jeong, K., Kim, D. and Joo, G. (2007), Delayed influence of dam storage and discharge on the determination of seasonal proliferations of *Micrrocystis aeruginosa* and *Stephanodiscus hantzschii* in a regulated river system of the lower Nakdong river (South Korea), *Water Res.*, Vol. 41, No. 8, pp. 1269~1279.
8. Jiang, W., Lai, Z. and Pang, S. (2010), Spatio-temporal distribution of chlorophyll-a and primary productivity in the pearl river estuary, *J. Ecol. Rural Environ.*, Vol. 26, No. 2, pp. 132~136.
9. Lee, Y. and Ahn, K. (2012), Actual Vegetation and Vegetation Structure at the Coastal Sand Bars in the Nakdong estuary, South Korea, Vol. 26, No. 1, pp. 911~922.
10. Lee, J., Lee, J. B., Kim, J., Lee, D., Shin, Y. and Jang, D. (2009), Seasonal Species Composition of Marine Organism Collected by a Shrimp Beam Trawl in Nakdong river estuary, Vol. 21, No. 3, pp. 177~190.
11. Lee, J., Lee, J. B., Choi, Y., Yeon, I. and Lee, D. (2012), Study on comparison of fishes by trawl fishery in Nakdong river estuary, Korea, Vol. 24, No. 2, pp. 84~93.
12. Lombardo, A., Franco, A. and Pivato, A. (2015), Foodweb modeling of a river ecosystem for risk assessment of down-the-drain chemicals: a case study with AQUATOX, Vol. 508, No. 3, pp. 214~227.
13. Nidzicko, N., Needoba, J. and Monismith, S. (2014), Fortnightly tidal modulations affect net community production in a Mesotidal estuary, *Estuar. Coast.*, Vol. 37, No. 1, pp. S91~S110.
14. Park, S., Lee, J., Choi, J., Heo, N. and An, S. (2016), Study on the long-term changes in water quality and benthic ecology and evaluation on effect of the barrage in Nakdong river estuary, Vol. 18, No. 1, pp. 58~67.
15. Park, H., Park, C., Song, M., Baek, K. and Shin, S. (2001), Evaluation of water quality characteristic using factor analysis in the Nakdong river, Vol. 17, No. 6, pp. 693~701.
16. Park, S., Yoon, H., Lee, I. and Kim, H. (2008), Correlation between meteorological factors and water discharge from the Nakdong river barrage, Korea, Vol. 14, No. 2, pp. 111~117.
17. Shen, X., Sun, T. and Liu, F. (2015), Aquatic metabolism response to the hydrologic alteration in the Yellow river estuary, China. *J. Hydrol.*, Vol. 525, No. 1, pp. 42~54.
18. Shin, S., Baek, K. and Song, M. (2002), The evaluation for maximum chl-a site observed in the mid to lower Nakdong river, Vol. 35, No. 1, pp. 21~27.
19. Song, J., Yoon, B., Kim, J., Lim, C. and Woo, S. (2014), Spatial and temporal variability of residual current and salinity distribution according to freshwater discharge during monsoon in Nakdong

- river estuary, Vol. 26, No. 3, pp. 184~195.
20. Staehr, P., Testa, J. and Michael Kemp, W. (2012), The metabolism of aquatic ecosystems: history, applications, and future challenges, Vol. 74, No. 1, pp. 13~27.
  21. USEPA (2014), AQUATOX: Linking Water Quality with Aquatic Life, Sherp webinar, Office of Water, US EPA, pp. 23~25.
  22. Wei, H., Zhao, I. and Feng, S. (2003). Annual cycle of phytoplankton biomass and primary production in the Bohai sea simulated by a three-dimensional ecosystem model, *Acta Oceanol. Sin.*, Vol. 25, No. 2, pp. 66~72.
  23. Yan, J., Liu, J., You, X., Shi, X. and Zhang, L. (2018), Simulating the gross primary production and ecosystem respiration of estuarine ecosystem in North China with AQUATOX, Vol. 373, No. 1, pp. 1~12.
  24. Ye, Y., Bak, K., Oh, D., Lee, C., Lee, Y. and Jung, H. (2019), Ecological monitoring for Nakdong estuary, Vol. 1, No. 1, pp. 101~146.
  25. Yoo, M., Youn, S., Park, K., Kim, A., Yoon, S. and Suh, Y. (2016), The characteristics of spatio-temporal distribution on phytoplankton in the Nakdong river estuary, during 2013-2015, Vol. 22, No. 6, pp. 738~749.
  26. Zhang, L., Liu, J., Li, Y. and Zhao, Y. (2013), Applying AQUATOX in determining the ecological risk assessment of polychlorinated biphenyl contamination in Baiwangdian lake, North China, Vol. 265, No. 3, pp. 239~249.
  27. Zhang, L. and Liu, J. (2014), AQUATOX coupled foodweb model for ecosystem risk assessment of Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in lake ecosystems, Vol. 191, No. 1, pp. 80~92.
  28. Zhu, F., Song, W., Sun, W. and Ma, W. (1993), Primary production and seasonal variations of Haihe river, *Tianjin Fish.*, Vol. 1, No. 1, pp. 31~33.