

수질관리를 위한 시화호의 환경용량 산정

김형철·최우정·이원찬^{**}·구준호^{***}·이필용·박성은^{**}·홍석진^{**}·장주형^{**}
국립수산과학원 서해수산연구소, ^{*}국립수산과학원 연구혁신본부,
^{**}국립수산과학원 환경관리팀, ^{***}국립수산과학원 제주수산연구소
(2005년 12월 2일 접수; 2007년 1월 2일 채택)

Estimating Carrying Capacity of Lake Shihwa for Water Quality Management

Hyung-Chul Kim, Woo-Jeung Choi^{*}, Won-Chan Lee^{**}, Jun-Ho Koo^{***},
Pil-Yong Lee^{*}, Sung-Eun Park^{**}, Seok-Jin Hong^{**} and Ju-Hyoung Jang^{**}

^{*}West Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Incheon 400-420, Korea

^{**}Headquarters for Research Planning and Management Innovation, NFRDI, Busan 619-902, Korea

^{***}Marine Environment Management Team, NFRDI, Busan 619-902, Korea

^{****}Jeju Fisheries Research Institute, NFRDI, Jeju 690-192, Korea

(Manuscript received 2 December, 2005; accepted 2 January, 2007)

The mechanism of water pollution in Lake Shihwa, one of highly eutrophicated artificial lakes in Korea, has been studied using a numerical 3D physical-biochemical coupled model. In this study, the model was applied to estimate the contribution of land-based pollutant load to water quality of heavily polluted Lake Shihwa. The chemical oxygen demand(COD) was adopted as an index of the lake water quality, and the spatial distribution of an average COD concentration during the summer from 1999 to 2000 was simulated by the model. The simulated COD showed a good agreement with the observed data. According to reproducibility of COD, the highest levels between 8 and 9 mg/L were shown at the inner site of the lake with inflow of many rivers and ditches, while the lowest was found to be about 5 mg/L at the southwestern site near to dike gate. In the prediction of water quality of Lake Shihwa, COD showed still higher levels than 3 mg/L in case of reduction of 95% for land-based pollutant load. This suggests that the curtailment of land-based pollutant load is not only sufficient but the improvement of sediment quality or the increase of seawater exchange should be considered together to improve a water quality in Lake Shihwa.

Key Words : Physical-biochemical coupled model, Lake Shihwa, Water quality, Land-based pollutant load, Carrying capacity

1. 서론

시화호는 과거에 우리나라 서해안 중부에 위치한 작은 만이었지만, 수도권 인구의 급증과 공업용수 확보에 기여하고 농지와 담수호를 조성하여 2000년대의 안정적 식량 공급을 위해 1994년 1월에 방조제를 축조하였다. 방조제 완공 후 해양환경과의 단절

로 해수 유출입이 제한되었고, 특히 안산시를 중심으로 한 도시인구의 급격한 증가와 공업단지 형성, 농촌지역의 가축사육 증가로 유역으로부터 유입되는 오염물질이 담수호 내에 축적되어 수질 악화가 가속화되었다^{1,2)}.

시화호의 수질이 극히 악화됨에 따라 담수호의 기본 기능을 포기하고 1997년 7월부터 정기적으로 오염된 담수를 방류하고 외해수를 유입하기 시작하였으며, 1998년에는 배수갑문을 상시 개방하였다. 그 결과 배수갑문을 통해 제한적인 해수 혼합이 일

Corresponding Author : Hyung-Chul Kim, West Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Incheon 400-420, Korea
Phone: +82-32-745-0672
E-mail: hckim@momaf.go.kr

어나고 갑문 부근의 환경은 개선된 것으로 나타나고 있으나, 아직까지 방조제 건설 이전의 수질을 회복하지 못하고 있는 실정이다^{3,4)}.

배수갑문을 운영함으로써 외해수의 유입을 통한 희석의 효과로 시화호의 수질을 개선시키고자 했던 당초 계획에 비해 기대할만한 수준의 수질 개선이 이루어지지 않고 있는 이유는 여전히 시화호 주변의 육상으로부터 유입되는 오염물질의 통제가 제대로 이루어지지 않고 있기 때문이다. 즉, 시화호의 수질을 개선시키고자 하는 노력에 비해 여전히 수질이 개선되지 않고 있는 가장 큰 원인은 해수유동을 시도한 이후 시화호 내부의 오염물질을 시화호 바깥쪽으로 유출시키고 외측의 해수를 유입시킴으로써 수질을 개선시키려는 능력보다 처리되지 않은 육상기원 오염물질이 여전히 시화호 내부로 유입되고 있고, 이러한 오염물질은 시화호가 스스로 감당하여 자연적으로 정화하여 처리할 수 있는 능력을 이미 초과하여 과잉 공급되고 있기 때문이다.

시화호로 유입되어 오염을 유발시키는 시화호 유역 내의 주요 오염원은 크게 세 가지로 구분할 수 있는데, 첫째, 공장폐수로서, 현재는 공단에서 발생하는 폐수는 차집하여 시화호수처리장을 거쳐 방조제 외해로 방류하고 있으나 강우시에는 넘쳐흘러 시화호로 유입되고 있으며, 둘째, 생활하수의 유입으로, 방조제를 건설할 당시에는 시화호 유역이 개발되지 않았기 때문에 유역하천의 오염도가 낮았지만 도시개발로 인해 오염이 가중되었으며, 현재는 반월토구를 통한 오염물질은 전량 하수처리장으로 이송되고 있지만 대부분의 하천수는 거의 처리되지 않고 시화호 내로 유입되고 있는 실정이다. 셋째, 비점원 오염물질로서, 시화호 유역에는 가축 사육장이 많이 산재해 있어 많은 양의 축산폐수를 발생시키고 있으며, 강우시 하천으로 유입되고 있다. 따라서, 시화호 주변의 육상기원 오염물질의 대부분이 처리되지 않은 채 시화호로 유입되고 있기 때문에 외부로부터의 오염의 압력에 그대로 노출되어 있고, 또한 방조제로 둘러싸여 있어 오염물질이 쉽게 빠져나가지 못하고 시화호 내부에 축적되기 쉬운 구조를 가지고 있다.

이와 같이 해수교환이 불량한 만이나 방조제로 둘러싸인 인공호 등은 구조적인 면에서 오염에 매우 취약하며, 그 만이 감당할 수 있는 환경용량을 초과하여 영양염류가 대상수역에 유입될 경우 쉽게 부영양화 된다. 이에 따라 식물플랑크톤 대발생 현상이 나타나고 과도한 생물량의 증가로 수체가 혼탁해지며, 수온이 상승하는 여름철에는 표, 저층간 성층현상이 뚜렷해져 저층에서 빈산소 또는 무산소

환경이 형성되어 결국 수이용 목적으로서의 이용가치가 떨어지게 된다. 이러한 경우, 자정능력을 초과하여 오염이 심화되고 있는 수역에 대해 환경용량을 산정하고, 환경용량을 초과하는 오염부하에 대해서는 적용가능한 삭감계획을 수립하여 더 이상 오염이 진행되는 것을 허용해서는 안 될 것이다.

환경용량의 개념을 적용하여 연안 해역의 환경을 관리하는 것은 그 대상을 크게 두 가지 범주로 구분하여 적용할 수 있는데⁵⁾, 첫째, 주어진 환경조건 하에서 양식어장의 최대수용력이라 정의하는 양식생물의 관점에서, 둘째, 환경악화를 일으키기 시작하는 오염물질 부하량의 한계 즉, 시스템 내 자정능력의 한계라 정의하는 환경의 관점에서 각각 환경용량을 산정하고 대상 시스템을 평가할 수 있다. 그러므로, 오염에 취약한 반폐쇄성 내만이나 오염된 연안 해역은 환경용량 산정을 통하여 환경용량 이하로 오염물질 유입량을 삭감시키는 방향으로 환경을 관리해야 한다.

양식이 집약적으로 이루어지고 있는 만을 대상으로 하여 양식생물의 최대수용력을 산정하고⁶⁻⁹⁾, 연간 최대 생산량을 위한 최적 생물 크기와 밀도를 예측하거나¹⁰⁻¹²⁾ 스스로 자정능력을 초과하여 더 이상 회복되기 어려운 오염된 수역의 환경용량을 평가하고 수질을 관리하는데 생태계모형은 유용한 도구로 활용되고 있다¹³⁻¹⁷⁾.

지금까지 시화호의 수질관리를 위해 많은 연구가 수행되었지만 대부분 담수호 조성 후 극도로 과잉양화된 상태를 진단하고 수립된 것이거나^{2,18,19)} 해수 유입을 시도한 시기를 중심으로, 또는 그 이후 수문을 개방하여 이미 해수화된 시화호의 변화된 생태계 내 수환경요인과 오염과의 상관성을 찾는 데 초점이 맞추어져 있다²⁰⁻²²⁾.

현재 시화호는 다각면에서 수질관리대책이 요구되고 있는데, 본 연구에서는 생태계 모델을 이용하여 수문조작으로 해수 유출입을 시도한 이후 환경생태학적으로 완전히 기수호화 된 시화호의 물질순환과정을 모형화하고, 현 상태의 수질을 재현하여 육상기원 오염부하가 수질에 미치는 영향의 정도를 예측하였고, 아울러 현재의 시화호가 오염물질을 감당할 수 있는 한계가 어느 정도인지 유기오염의 지표인 화학적산소요구량을 기준으로 시화호의 환경용량을 평가하였다. 그리고, 시화호의 수질을 해역 이용 목적에 맞는 기준으로 회복시키기 위해서 삭감해야 할 오염물질 부하량은 어느 정도인지 화학적산소요구량을 기준으로 다양한 시나리오를 통하여 시스템 공학적인 접근을 시도하였다. 시화호의 안정된 생태계 유지와 오염저감 방안을 마련하는데 유

용한 자료로 활용되고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 대상해역

시화호 유역 내에는 경기도 군포시, 안산시, 시흥시, 화성군 등이 위치하고 전체 유역면적은 476.5 km²이며, 호의 면적은 56.5 km²이다. 유효 저수량은 181,480 천 톤이고, 최고 수심은 17.9 m이며, 대부분의 수역은 4~5 m 내외로 얇다. 시화호는 약 12.7 km에 이르는 방조제로 둘러싸여 있으며, 108 m 길이의 수문에 의해 해수가 유출입하고 있다¹⁾.

시화호가 위치한 우리나라 서해안은 조석간만의 차가 큰 곳이어서 방조제를 막기 이전에는 오염물질의 회석, 확산이 용이하였으나 방조제에 의해 이러한 작용이 차단되었다. 또한 시화호는 육지로부터 유입되는 담수량에 비해 호수의 용량이 너무 크기 때문에 저층에는 해수가 잔류하여 수층 간에 강한 밀도 성층이 형성되었으며, 이로 인하여 표층에서 저층으로의 용존산소 공급이 제한되는 등 물의 체류시간이 길어지면서 수질악화가 가속화되었다. 현재 시화호는 방조제 서쪽 끝의 수문을 통해 시화호 내, 외측으로 해수가 유입 또는 유출되고 있지만, 환수되는 그 양이 시화호 수질을 개선시키려는 당초의 목적에 미치지 못하고 있다. 즉, 방조제에 의한 해수소통의 차단이 현재 시화호 오염의 주요한 원인중 하나이다.

시화호 오염을 일으키는 또 한 가지 사실은 시화호 유역으로 유입하는 육상오염물질이다. 시화호 방조제 축조 당시에는 주변도시가 개발되기 이전이었기에 시화호가 깨끗한 담수호로 조성되리라 예상했지만 여러 가지 예상치 못한 문제로 인하여 호 내의 오염은 가속화되었다. 시화호 유역에 위치한 주요 하천은 신길천, 동화천, 화정천, 안산천, 구룡천, 삼화천, 문산천의 자연하천이 7개가 있고, 인공하천 및 수로의 형태로 반월토구, 시화간선수로, 임시차집수로, 반월외곽수로, 본오배수구 및 구룡천 등 16개가 있다. 이와 같이 하천 및 수로를 통해 육상으로부터 흘러들어오는 오염부하는 시화호 북동쪽 공단지역에 집중되어 흐르고 있으며 최종적으로 시화호 내로 유입되고 있다.

2.2. 생태계모델의 적용

본 연구에 사용된 모델은 해수유동을 시뮬레이션하기 위한 다층 모델(COSMOS)과 수질을 시뮬레이션하기 위한 생태계 모델(EUTRP2)로 구성되어 있다. 본 모델에 사용된 기본방정식과 경계조건 등은 Nakata와 Taguchi²³⁾에 의해 잘 설명되어 있으며, 국내에서도 내만 및 연안에서 그 사용 목적에 맞게

연구 개량되어 적용되어왔다^{7-9,12-14)}.

생태계모델에 의해 적용된 해역의 임의 지점에서 수질(B)의 시간에 따른 농도변화는 다음과 같은 확산방정식에 의해서 기술된다.

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -u \frac{\partial B}{\partial x} - v \frac{\partial B}{\partial y} - w \frac{\partial B}{\partial z} \quad (1)$$

조석류 또는 잔류수에 의해서 운반되는 (이류)효과를 나타내는 항

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial B}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial B}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial B}{\partial z} \right]$$

난류확산(혼합)을 나타내는 항

$$+ \frac{dB}{dt}$$

생물·화학적인 모든 과정을 포함하는 항

여기서 dB/dt는 모든 생물·화학적 과정에 의한 단위시간 당 수질 구성요소의 변화량을 나타낸다. 해수유동모델의 시뮬레이션에서 계산된 유속성분(u, v, w)을 생태계 모델에 입력하여 각 구성요소에 대한 현존량의 시간적, 공간적인 변화를 계산한다.

dB/dt의 구성요소는 Table 1과 같이 4개의 유기태 요소, 2개의 무기태 요소 및 2개의 수질 요소가 있는데, 유기태의 구성요소에는 식물플랑크톤(P), 동물플랑크톤(Z), 입자성비생물유기물(detritus, POM) 및 용존유기물(DOM)이 있고 무기태의 구성요소에는 인산인(DIP)과 용존무기질소(DIN)가 있으며 수질의 구성요소로서 용존산소(DO)와 화학적산소요구량(COD)이 정의되어 있다.

수질의 구성요소 중 COD는 산소를 소모하는 유기물질의 양을 간접적으로 표현하는 수질오염의 지표로 사용되고 있으며, 모델에서는 총 4가지의 유기물 구성요소에 대해 생화학적 과정을 포함하여 나타내고 있다. 모델에서 계산되는 COD의 생화학적 변화는 다음과 같이 수식화로 표현된다.

$$\left(\frac{dCOD}{dt}\right)^* = Y_P \left(\frac{dP}{dt}\right)^* + Y_Z \left(\frac{dZ}{dt}\right)^* \quad (2)$$

$$+ Y_{POC} \left(\frac{dPOC}{dt}\right)^* + Y_{DOC} \left(\frac{dDOC}{dt}\right)^*$$

(dP/dt)*, (dZ/dt)*, (dPOC/dt)*, (dDOC/dt)* 는 각각 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 입자성 유기물질과 용존성 유기물질의 단위시간당 생화학적 변화에 따른 증감량이다. Y_P, Y_Z, Y_{POC}, Y_{DOC} 는 각 해당 유기물질의 탄소량에 대한 COD 환산계수로 mg C · m³ ·

Table 1. Input data for a biochemical model

Parameters		Input values						
Mesh size		$\Delta x = \Delta y = 330$ m						
Level		1 (0~3 m), 2 (3~6 m), 3 (6 m~bottom)						
Time interval		400 sec						
Initial condition for compartments								
Level	DO (mg/L)	COD (mg/L)	DIP ($\mu\text{g-at/L}$)	DIN ($\mu\text{g-at/L}$)	POC (mgC/m ³)	DOC (mgC/m ³)	PHYTO (mgC/m ³)	ZOO (mgC/m ³)
1~3	8.00	5.00	1.00	50.00	1000.0	5000.0	500.00	50.0
Boundary condition for compartments								
Level	DO (mg/L)	COD (mg/L)	DIP ($\mu\text{g-at/L}$)	DIN ($\mu\text{g-at/L}$)	POC (mgC/m ³)	DOC (mgC/m ³)	PHYTO (mgC/m ³)	ZOO (mgC/m ³)
1~3	9.00	1.50	0.50	5.00	300.0	1500.0	100.00	10.0
Horizontal viscosity coefficient					1.0 E2 (cm ² /s)			
Horizontal diffusion coefficient					1.0 E2 (cm ² /s)			
Vertical diffusion coefficient					Level 1: 0.100 (cm ² /s)			
					Level 2: 0.010 (cm ² /s)			
					Level 3: 0.001			
Total runtime					100 tidal cycles			
Pollutant loads								
Name of stream	DO (ton/day)	COD (ton/day)	DIP (kg/day)	DIN (kg/day)				
Donghwa	0.10	5.95	546.0	1290.0				
Banwol	0.10	3.26	161.0	668.0				
Hwajeong	0.10	2.35	118.0	1260.0				
Ansan	0.10	2.83	122.0	874.0				
Singil	0.10	1.74	73.0	736.0				
Guryong	0.05	0.78	53.0	571.0				
Gongdan	0.05	2.67	90.0	378.0				
Samhwa	0.05	0.46	100.0	214.0				

day⁻¹로 표현되는 각 유기물질의 탄소량을 COD/C비에 따른 COD 환산계를 곱하여 궁극적으로 수층에서의 COD 단위인 mg COD · l⁻¹ · day⁻¹로 표현된다.

저생생물이나 퇴적물 등으로 이루어진 해저계도 환경인자로서 취급하여 모델의 변수로 구성되어 있다. 각 모델 요소들의 물질순환 과정을 Fig. 1에 나타내었다.

2.3. 모델영역과 입력자료

본 연구의 모델 영역은 Fig. 2와 같이 외해 경계를 시화호 방조제 수문으로 하고 남북 및 동서 방향으로 동일하게 정방 격자로 이루어진 13,776개(82 × 56 × 3)의 격자망으로 구성하였으며, 각 격자와 격자 사이의 간격은 330 m이다. 연직 방향의 수층은 시화호의 밀도 및 수온 성층을 고려하여 표층(Level

1: 0~3 m), 중층(Level 2: 3~6 m), 저층(Level 3: 6 m~해저)으로 구분하였다. 모델에서 설정된 개방영역(open boundary)은 방조제 수문에서 1개 격자(330 m)로 하였는데, 방조제 수문의 길이는 108 m이므로 실제 길이의 약 3배 정도에 해당한다.

생태계 모델에 입력한 초기치, 경계치 및 오염부하량 자료는 Table 1에 나타내었고, 각종 문헌자료^{3,24)} 및 환경부²⁵⁾의 연도별 관측자료를 이용하여 입력하였고, 총 계산시간은 100 조석주기로 하였다. 입력된 오염부하량은 유역 내의 신길천, 화정천, 안산천, 반월천, 동화천, 삼화천, 구룡천 및 공단토구 등으로부터 만 내로 유입되는 유입 부하량을 기준으로 하였다. 유역 내에 하수도 보급률이 높지 않고, 일부지역에서는 하수 관거의 오점으로 인하여 오염물질의 배출경로가 확실하지 않기 때문에 하천 및 배수구에서 시화호로 유입하는 오염물질은 모두 비점원으

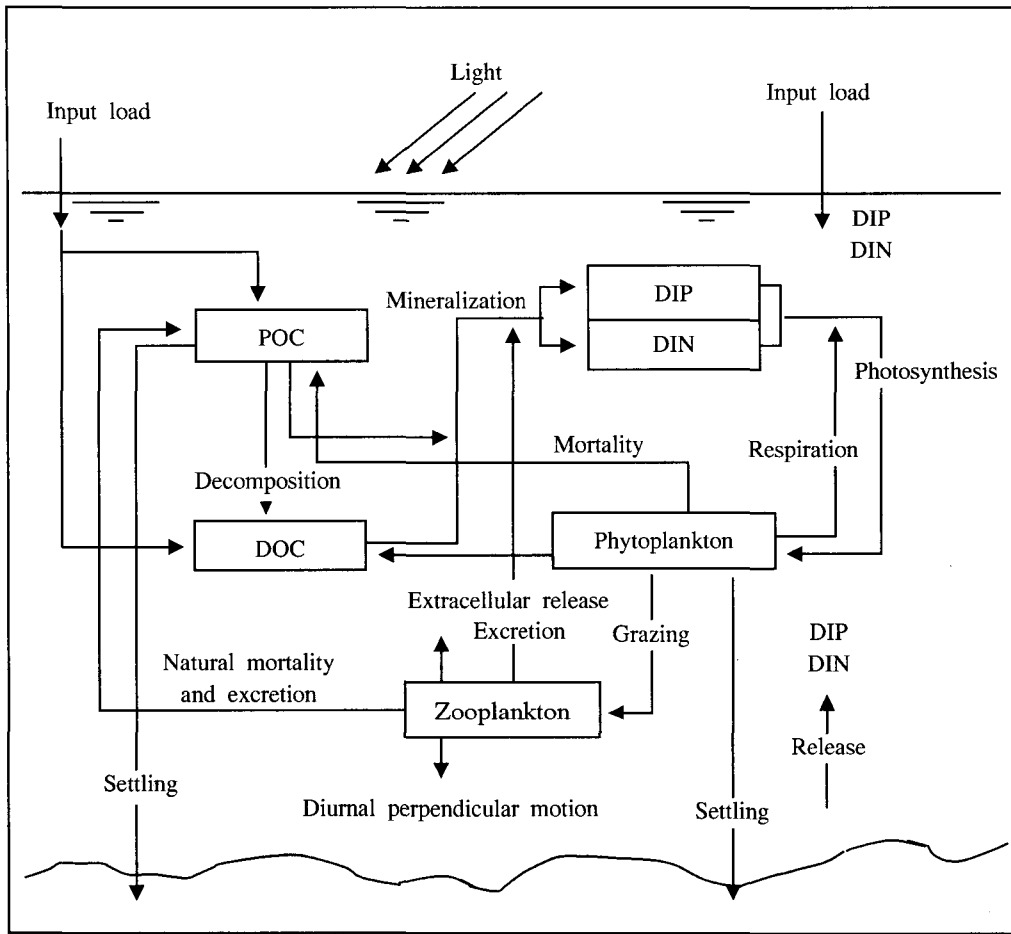


Fig. 1. Schematic diagram of biogeochemical cycles in the lower trophic marine ecosystem of the biochemical model.

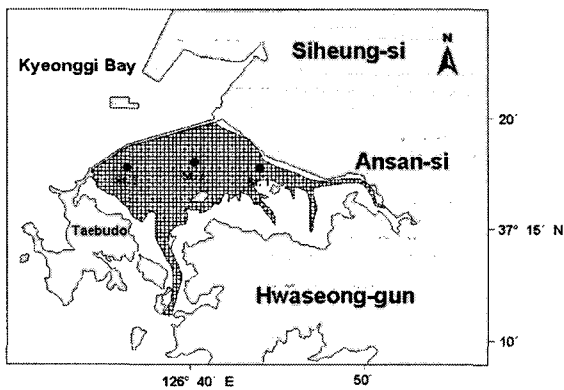


Fig. 2. Calculated area and meshes in Lake Shihwa. Stations marked with the black dots (St. 1-3) are the administrative water quality monitoring points and measurement undertaken by Ministry of Environment.

로 간주하고 STORM 모형을 사용하여 오염 부하량을 계산한 한국수자원공사²⁴⁾의 자료 중 8월의 자료를 이용하였다. 생물학적 주요 변수는 기존 측정된 자료와 문헌조사를 통하여 입력하였으며, 그 값은 Table 2에 나타내었다. 해수유동모델에 의한 시화호의 유동 특성은 해양수산부²⁶⁾의 연구에서 적용한 결과를 사용하였다.

퇴적물로부터 용출되는 인과 암모니아질소의 실측값은 각각 $34 \sim 1,945 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$, $41 \sim 223 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 정점 및 시기별로 크게 변화하는 것으로 나타났다. 그 편차도 상당히 크게 나타났다²⁴⁾. 하계의 시화호 퇴적환경은 거의 모든 수역에서 용존산소가 거의 없는 환원환경을 나타내고 있고, 시화호 전체 퇴적물에서 저층 수층으로 영양염류의 공급이 이루어지고 있다. 따라서, 하계에 관측된 자료 중 용출 가능 범위에서 적정 용출부하율을 산정하였으며,

Table 2. Values of biological parameters used in the biochemical model

Parameter	Nomenclature	Unit	Value
<i>Phytoplankton</i>			
Maximum growth rate	G_{max}, β_{Gmax}	day ⁻¹ , °C ⁻¹	$0.80 \cdot \exp(0.0633T)$
Half saturation constants for nutrient uptake	K_{SP}, K_{SN}	μM	Phosphate 0.3, Nitrogen 1.0
Photosynthetic light optimum	I_{opt}	ly · day ⁻¹	150
Light extinction coefficient	k	m ⁻¹	0.70
Respiration rate	P_{resp}, β_{Presp}	day ⁻¹ , °C ⁻¹	$0.010 \cdot \exp(0.0524T)$
Sinking rate of living cells	w_p	m · day ⁻¹	0.100
Rate of natural mortality	P_{mot}, β_{Pmot}	day ⁻¹ , °C ⁻¹	$0.050 \cdot \exp(0.0693T)$
C/Chl.a ratio	[Chl.a:C]	by weight	47.62
<i>Zooplankton</i>			
Maximum ration	R_{max}, β_{Rmax}	day ⁻¹ , °C ⁻¹	$0.18 \cdot \exp(0.0693T)$
Ivlev's constant	λ	(mgC/m ³) ⁻¹	0.01
Growth efficiency	v	-	30% of the daily
Assimilation efficiency	μ	%	70.0
Rate of natural mortality	Z_{mot}, β_{Zmot}	day ⁻¹ , °C ⁻¹	$0.048 \cdot \exp(0.0693T)$
<i>Detrital carbon</i>			
Mineralization rate	V_{POC}, β_{POC}	day ⁻¹ , °C ⁻¹	$0.018 \cdot \exp(0.0693T)$
Fraction of biodegradation	κ	-	25% of mineralization
Sinking rate	w_{POC}	m · day ⁻¹	0.432
<i>Dissolved organic carbon</i>			
Mineralization rate	V_{DOC}, β_{DOC}	day ⁻¹ , °C ⁻¹	$0.008 \cdot \exp(0.0693T)$
<i>Others</i>			
Aeration rate	k_a	day ⁻¹	0.15

또한 시화호 전체 퇴적물을 대표할 수 있는 실측치로 선택하기에 정점별로 값의 차이가 크고 뚜렷한 경향을 보이지 않아 모델 입력값은 인과 암모니아 질소의 용출부하율을 각각 50 mg/m²·day 및 250 mg/m²·day로 하였고, 모델 각 격자에서 같은 값을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수질의 재현

생태계 모델을 이용하여 시화호의 화학적 산소요구량 농도를 재현하였고, 모델에 의해 계산된 결과의 재현성 평가는 현장관측 자료가 있는 화학적 산소요구량을 대상으로 하였다. 환경부²⁵⁾의 연도별 화학적 산소요구량 자료 중 1999년과 2000년의 여름철(6~9월)에 시화호 내의 3개 정점에서 관측된 표층 자료와 모델에 의해 계산된 표층의 결과를 비교한 결과, 상관성(R = 0.99)은 양호하였으나 관측치에 비해 계산치가 다소 높게 나타났으며, 상대오차는 2.7~9.2% 범위였다(Fig. 3).

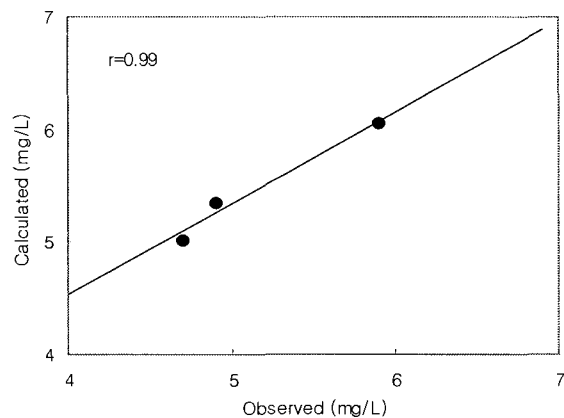


Fig. 3. Comparison of the observed and the simulated chemical oxygen demand concentration at three stations in Lake Shihwa. Observations are based on the summertime average of the monthly data from 1999 to 2000 reported by Ministry of Environment. Location of the monitoring stations are shown in Fig. 1.

모델에 의해 재현된 시화호 내 화학적산소요구량의 농도 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 하천이 밀집되어 있고, 미처리된 오·폐수가 도시하천 및 공단배수로를 통해 직접 유입되고 있는 시화호의 상류부에 해당하는 내측 수역의 표층에서 8~9 mg/L의 높은 농도 분포를 보였다. 시화호의 중앙 수역에서 5.5 mg/L의 농도 분포를 나타내어 내측 수역에서 중앙 수역까지 농도가 점차 감소하는 경향을 나타내었지만, 여전히 오염물질의 영향이 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 방조제의 수문이 위치한 호의

남서쪽 수역에 해당하는 정점 3 부근 수역에서는 방조제 수문을 통해 유입되는 시화호 외측 수역의 해수의 영향을 가장 많이 받는 지역으로 5 mg/L 내외의 가장 낮은 농도 분포를 나타내었다. 중층의 농도 분포에서는 호의 내측 수역에서 8~9 mg/L의 농도 분포를 보여 표층의 농도 분포와 유사하였고, 호의 중앙부와 방조제 수문에 이르는 수역은 5 mg/L 이하로 표층에 비해 다소 낮은 농도 분포를 나타내지만, 그 농도 분포 범위가 표층에 비해 다소 넓게 나타났다. 저층의 농도 분포는 모델에 의해 계산된 수십 6 m 이하인 지역에서만 나타내었고, 그 대상 지역이 형도를 기준으로 북쪽방향으로, 시화 방조제까지 좁은 지역으로 표현되었으며, 전체적으로 4.5 mg/L 내외의 농도 분포 경향을 나타내었다. 시화호 내측수역과 중앙수역의 일부 지역, 그리고 북쪽 방조제 근처에서 다소 높은 농도 분포 특성을 나타내고 있다.

3.2. 주요 오염부하의 삭감에 따른 수질변동 예측
방조제로 둘러싸인 시화호의 수질에 영향을 미치는 인자로 육상오염부하, 퇴적물로부터의 영양염 용출부하, 그리고 시화호 내 전체 수역에 비해 상대적으로 아주 좁은 방조제 수문을 통해 해수가 유·출입되고 있어, 호 전체의 수질을 개선하기에는 불량한 해수유동 패턴을 꼽을 수 있다. 즉, 시화호는 방조제가 완공됨에 따라 해수소통이 차단되어 호 내의 수체가 정체되었고, 또한 외부기원유기물이 시화호로 유입되어 식물플랑크톤이 성장하는데 필수적인 영양염류를 공급함으로써 식물플랑크톤이 대량성장할 수 있는 좋은 조건을 제공하게 되었다. 그러나 식물플랑크톤이 bloom을 일으킨 이후, 사멸되면서 생성되는 유기물은 저층으로 침강, 퇴적함으로써 내부생성유기물의 증가를 초래하여 시화호 내 이차오염을 가중화시키고 있다.

따라서, 시화호의 오염을 유발시키는 주요 요인 중 하천을 통하여 유입하는 유기물 오염 부하량과 인, 질소 등의 영양염류 부하량이 시화호의 수질에 미치는 영향을 예측하기 위하여 각각의 오염 부하량을 단계별로 0%, 40%, 75%, 95% 저감한다고 가정하였을 경우, 호 내측수역, 중앙 및 배수갑문 인근 수역의 화학적산소요구량 농도 변화를 모델을 통하여 예측한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

시화호 내측수역에 해당하는 정점 1에서 오염부하를 줄이지 않았을 경우, 표층의 화학적산소요구량 농도는 6.06 mg/L 였으나 40% 삭감하였을 경우는 4.69 mg/L로, 75% 삭감하였을 경우에 3.50 mg/L로 개선되었다. 95% 삭감에서는 대부분의 수역에서 3 mg/L 전후의 농도 분포를 나타내었다. 따라서, 시화

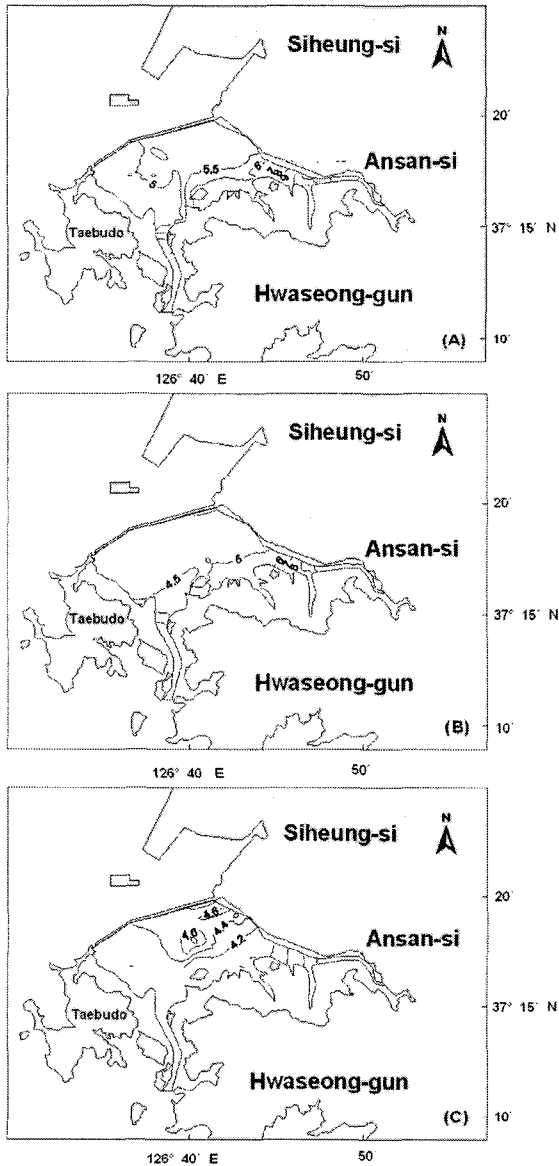


Fig. 4. Distributions of the simulated COD(mg/L) at surface(A), middle(B) and bottom(C) level.

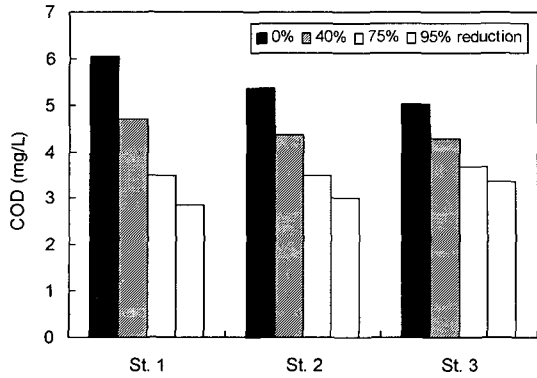


Fig. 5. Model result of COD concentrations in case of the reduction of land-based pollutant load at three water quality monitoring stations.

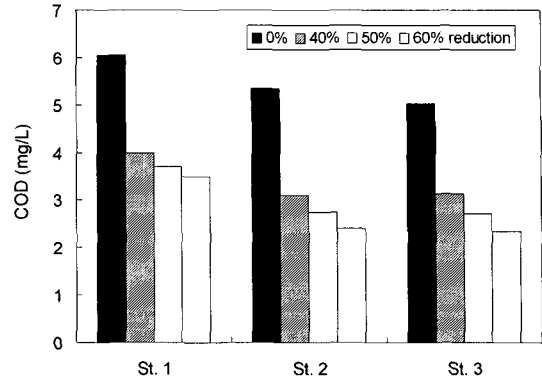


Fig. 6. Model result of COD concentrations in case of reduction of benthic nutrient (N, P) regeneration and benthic oxygen consumption from sediment.

호의 수질개선 목표를 해수욕 등 해양에서의 관광 및 여가선용 등이 가능한 해역생활환경 II등급 기준(COD 2 mg/L 이하)으로 할 경우에 육상으로부터 유입되는 오염부하의 삭감만으로는 한계가 있는 것으로 예측되었다.

한편, 퇴적물과 수질사이에는 끊임없는 물질순환을 하므로 퇴적물의 오염은 수질오염으로 이어진다. 시화호는 방조제 축조 이후 해수교환의 불량과 인근 하천으로부터의 유입부하의 증가, 부영양화 진행에 따른 식물플랑크톤의 과다 번식 등으로 오염물질이 호 내에서 증가하게 되었고, 이러한 수계(water column) 내 오염물질은 퇴적물로의 축적으로 이어져 퇴적물 오염 또한 심각한 실정이다. 따라서, 시화호의 퇴적물을 인위적으로 개선하여 퇴적물로부터 인과 질소의 용출량과 저층 산소소비를 줄인다고 가정하였을 경우에 수질에 미치는 영향의 정도를 모델을 통하여 예측하였다(Fig. 6).

퇴적물로부터 인과 질소의 부하량과 저층 산소소비를 각각 50%로 저감한다고 가정하였을 경우에 배수갑문과 호 중앙부 정점의 화학적산소요구량 농도는 각각 2.72 mg/L와 2.75 mg/L로 개선효과가 뚜렷하게 나타났다. 이와 같은 현상은 퇴적물로부터 용출되는 영양염류도 식물플랑크톤이 이용하여 성장함으로써 수계 내에서 유기물을 생산하는 것을 의미한다. 그러나, 호 내측수역의 정점 1에서는 3.71 mg/L의 높은 농도를 나타내어 타 지역에 비해 개선효과가 미흡하게 나타났으며, 이것은 퇴적물을 개선하더라도 하천으로부터 유입되는 오염부하의 영향이 크기 때문에 개선효과가 미미하게 평가되었다. 즉, 시화호 상류부의 경우에서처럼 육상기원오염부하를 제외하고 퇴적물로부터의 오염부하만을 고려하여 개선하는 것은 시화호 수질을 크게 개선시킬

수 없다는 것을 시사한다.

따라서, 육상으로부터 유입하는 유기물 및 영양염류 부하와 퇴적물에 의한 영양염류 용출부하 및 산소소비를 동시에 삭감하였을 경우를 Fig. 7에 나타내었다. 표층에서의 화학적산소요구량 농도는 내측 수역에서 2 mg/L 이상으로 비교적 높은 농도 분포를 나타내고 있지만 대부분의 수역에서 1.5~2.0 mg/L의 양호한 수질로 개선되는 것을 알 수 있다. 특히, 시화방조제 북측지역에서도 1.5 mg/L 이내로 크게 개선되는 것으로 나타났다. 중층의 경우, 호 구석부분에서는 2 mg/L 내외의 농도를 나타내었으나 대부분의 수역은 1.5 mg/L 내외로 예측되어 개선효과가 뚜렷하였다. 저층의 경우 역시 전체적으로 1.0 mg/L 내외로 개선되는 것으로 나타나 육상기원오염부하와 퇴적물 오염부하를 동시에 삭감하였을 때에 가장 높은 개선효과가 나타나는 것으로 예측되었다.

3.3. 시화호의 환경용량

반 폐쇄적 만이나 방조제로 둘러싸여 있어 조류소동이 불량하여 오염에 취약한 구조를 가지고 있는 연안해역에서, 환경의 관점에서 관리해야 할 환경용량의 개념은 주어진 대상 시스템에서 환경의 악화를 일으키기 시작하는 오염물질 부하량의 한계 즉, 자정능력의 한계를 의미한다. 생태계는 복잡한 대상 시스템 내 구성요소들 간의 상호작용에 의해 스스로 오염물질을 정화할 수 있는 능력을 가지고 있으나, 자정능력을 초과하여 유입되는 오염부하를 관리하기 위해서는 이에 상응하는 대책이 필요하다. 즉, 오염이 심각하거나 진행되는 과정에서는 대상 시스템의 자정능력의 한계를 파악하여 더 이상 오염이 진행되는 것을 막아야 할 것이다. 따라서, 목표 수질을 설정하고 이것을 달성하기 위해 삭감하여야

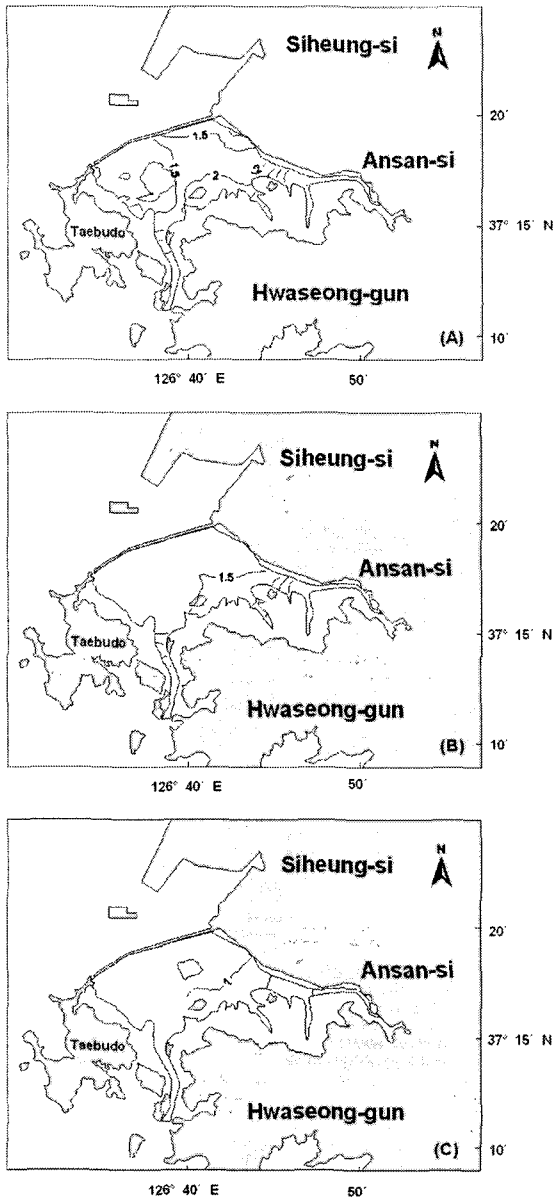


Fig. 7. Distribution of simulated COD(mg/L) at surface(A), middle(B) and bottom(C) level, in case of reduction of 70% for land-based pollutant load concurrently with reduction of 50% for benthic nutrient regeneration and benthic oxygen consumption from sediment.

할 오염부하량을 산정하면 총 유입부하량에서 삭감하여야 할 부하량을 빼고 남은 부하량이 그 해역에서 받아들일 수 있는 환경용량이 된다. 따라서 환경용량은 목표수질에 따라 달리 계산되게 된다.

시화호로 유입하는 육상기원 오염 부하량을 95% 삭감할 경우, 시화호의 각 정점의 화학적산소요구량은 3 mg/L로 계산되어 해수 교환량이 적고 퇴적물의 오염이 심한 현 상태의 환경 하에서 육상기원 오염물질의 대부분을 삭감하여도 해역생활환경 II등급 수질은 달성되기 어려울 것으로 판단된다 (Fig. 5).

그러나 공업용 냉각수나 선박의 정박에 이용되는 수질인 해역생활환경 III등급(COD 4 mg/L 이하)의 달성은 가능한 것으로 나타나고 있다. 육상기원 오염부하량의 40%를 삭감했을 경우에서 대부분의 수역에서 4 mg/L 이상의 농도로 계산되어 생활환경 III등급을 초과하고 있지만, 75%를 삭감할 경우에는 3~4 mg/L의 농도를 나타내어 생활환경 III등급이 달성될 수 있는 것으로 계산되었다. 따라서 생활환경 III등급을 달성하기 위한 시화호의 육상기원 오염 부하량(COD), 즉 환경용량은 5 톤/일로 산정되었다(Table 3).

다양한 시나리오를 통하여 시화호의 수질 변화를 수치모의한 결과, 현재의 시화호는 육상기원 오염부하량을 상당량 삭감하여도 해역생활환경 III등급 기준을 만족하기가 상당히 어려울 것으로 예측되었으나, 퇴적물을 인위적으로 개선시키면 보다 뚜렷한 수질 개선의 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다 (Fig. 5, 6).

시화호는 시화공단과 유입하천으로부터 상당량의 오염물질이 유입되고 있지만, 시화호 내로 유입하는 오염물질만을 관리한다고 해서 시화호의 수질이 개선되기는 어렵고, 일년 내내 과영양 상태를 유지하면서 식물플랑크톤의 대량 발생과 사멸을 되풀이함으로써, 이로 인한 내부발생 오염부하 또한 지속적으로 증가하고 있다. 따라서, 시화호의 수질관리를 위해 보다 구체적인 방향으로 접근이 필요하며 시화호 내로 유입하는 외부오염물질인 화학적산소요구량과 부영양화의 원인이 되는 영양염류, 그리고 이로 인해 발생하는 내부발생 오염물질인 식물플랑크톤의 제어 등을 고려한 후속 연구가 필요하다. 또

Table 3. Estimated carrying capacity of Lake Shihwa

Study area	Target grade of seawater quality	Input load of COD	Reduction rate	Carrying capacity
Lake Shihwa	III	20.0 tons/day	75%	5.0 tons/day

한 해수교환량 확대를 통해 시화호의 수질을 개선시키고자 하는 측면에서의 접근이 필요하며, 이를 위해서는 실제 시화호 방조제의 수문 크기로 보다 세밀한 격자망을 구성하여 모델을 통한 예측이 필요할 것이다.

현재 시화호는 해수유통이 제한되는 폐쇄된 공간 구조를 가지고 있으며, 외부기원 또는 내부발생 오염물질들은 시화호 내 물질순환과정을 통해 결국 퇴적물로 퇴적되고 있으며, 이러한 것들이 분해되는 과정에서 저층의 용존산소를 소모시키고, 결국 수질 오염을 가중화시키는 악순환을 되풀이하는 것이다. 본 연구를 통해 시화호의 수질을 보다 효과적으로 개선시키기 위해서는 육상기원 오염물질과 퇴적물의 개선을 동시에 고려해야지만 보다 확실한 수질 개선 효과를 나타낼 수 있을 것으로 보이며(Fig. 7), 이러한 노력은 결국 막대한 자본을 투입하여 시화 방조제 건설을 통한 인간의 이익을 극대화시키려는 것이 이익의 창출과 함께 또 다른 시화호 수질의 개선이라는 큰 당면 과제를 함께 수반하였다.

4. 요약

본 연구는 생태계 모델을 이용하여 수질오염이 심각한 시화호의 수질을 재현하고, 시화호 내로 유입하는 육상기원 오염부하량의 변동에 따른 시화호의 수질변화를 살펴보았다. 모델에 의해 계산된 화학적산소요구량 결과는 관측치와의 상관성이 양호하였으며, 하천이 밀집한 호의 내측 수역에서 8~9 mg/L의 높은 농도분포를 나타내었고, 방조제 수문이 위치한 남서쪽 수역에서 5 mg/L 내외의 가장 낮은 농도분포 특성을 보였다. 시화호로 유입하는 육상오염부하가 시화호의 수질에 미치는 영향을 살펴보았는데, 육상오염부하량을 95% 삭감시켜도 시화호의 화학적산소요구량 농도는 3 mg/L 내외로 계산되었으며, 이것은 해역생활환경 II등급 기준인 2 mg/L를 초과하는 것으로써 육상으로부터 유입되는 오염부하의 삭감만으로는 수질개선에 한계가 있는 것으로 예측되었다. 한편, 퇴적물을 인위적으로 개선하여 퇴적물로부터 인과 질소의 용출량과 저층 산소소비를 삭감시켰을 경우에 시화호 수질의 개선효과가 나타났다. 특히, 육상으로부터 유입하는 유기물 및 영양염류 부하와 퇴적물에 의한 영양염류 용출부하 및 산소소비를 동시에 삭감하였을 경우에 시화호 내 대부분의 수역에서 1.5~2.0 mg/L 이내로 수질이 크게 개선되는 것으로 나타났다. 따라서, 시화호는 육상기원 오염부하량을 상당량 삭감하여도 목표수질 기준을 만족하기가 상당히 어려울 것으로 예측되었고, 퇴적물을 인위적으로 개선시키

면 보다 뚜렷한 수질 개선의 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

시화호 내측과 외측수역과의 해수 교환량이 적고 퇴적물의 오염이 심한 현 상태의 환경조건에서 해역생활환경 III등급 기준인 4 mg/L 이하를 달성하기 위한 시화호의 환경용량은 화학적산소요구량 기준으로 5 톤/일로 산정되었다.

향후 시화호의 수질관리를 위해서는 시화호를 포함한 유역별로 뚜렷한 개선목표를 설정하고 배출원별 할당부하량을 산정하여 오염물질 총량관리를 통해 시화호 주변 유역의 점원, 비점원 및 시화호 내 퇴적물 등을 종합적으로 고려하여 관리해 나가야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국립수산과학원의 사업과제(환경관리해역 시범해역관리 시행계획 수립연구 및 서해해양환경연구, RP-2005- ME-015)의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 1) 한국수자원공사, 1996, 시화호 수질개선 종합관리대책 기본계획 보고서(요약), 130pp.
- 2) 허성희, 오임상, 1997, 인공호수 시화호와 주변해역의 생태계 연구: 서문, 한국해양학회지(바다), 2, 49-52.
- 3) 한국해양연구원, 1998, 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구(2차연도), BSPE 97610-00-1035-4, 230pp.
- 4) 해양수산부, 2000, 시화호 특별관리해역 제1차 지역포럼 자료집, 176pp.
- 5) 平野敏行, 1992, 環境からの概念. 漁場環境容量, 水産學シリーズ, 87, 恒星社厚生閣, 東京, pp. 9-19.
- 6) Carver C. E. A., Mallet A. L., 1990, Estimating the carrying capacity of a coastal inlet for mussel culture, *Aquaculture*, 88, 39-53.
- 7) 조은일, 박청길, 이석모, 1996, 가막만의 환경용량 산정(II)-굴양식장 환경용량 산정, 한국수산학회지, 29(5), 709-715.
- 8) 박종수, 김형철, 최우정, 이원찬, 박청길, 2002a, 굴 양식수역의 환경용량 산정 I. 생태계 모델을 이용한 거제·한산만 굴 먹이 공급량 추정, 한국수산학회지, 35(4), 395-407.
- 9) 박종수, 김형철, 최우정, 이원찬, 김동명, 구준호, 박청길, 2002b, 굴 양식수역의 환경용량 산정 II. 거제·한산만의 환경용량, 한국수산학회지,

- 35(4), 408-416.
- 10) Bacher C., Duarte P., Ferreira J. G., Héral M., Raillard O., 1998, Assessment and comparison of the Marennes-Oléron Bay (France) and Carlingford Lough (Ireland) carrying capacity with ecosystem models, *Aquat. Ecol.*, 31, 379-394.
 - 11) Campbell D. E., Newell C. R., 1998, MUSMOD[®], a production model for bottom culture of the blue mussel, *Mytilus edulis* L., *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 219, 171-203.
 - 12) 이원찬, 김형철, 최우정, 이필용, 구준호, 박청길, 2002, 패류양식해역 환경용량 산정 모델 구축 I. 모델 검증 및 민감도 분석, *한국수산학회지*, 35(4), 386-394.
 - 13) 최우정, 박청길, 이석모, 1994, 진해만의 빈산소 수괴 형성에 관한 수치실험, *한국수산학회지*, 27(4), 413-433.
 - 14) 김광수, 김동명, 박청길, 1999, 3차원 해수유동모델을 이용한 황해 환경용량의 개략산정, *한국해양환경공학회지*, 2(1), 53-73.
 - 15) Kishi M. J., Iwata Y., Uchiyama M., 1991, Numerical simulation model for quantitative management of mariculture, *Mar. Pollut. Bull.*, 23, 765-767.
 - 16) Cerco C. F., Cole T., 1993, Three-dimensional eutrophication model of Chesapeake Bay, *J. Envir. Eng.*, 119(6), 1006-1025.
 - 17) Taguchi K., Nakata K., 1998, Analysis of water quality in Lake Hamana using a coupled physical and biochemical model, *J. Mar. Syst.*, 16, 107-132.
 - 18) 한국수자원공사, 농어촌진흥공사, 1995, 시화지구 담수호 수질보전 대책수립 수립 조사보고서, 102-165.
 - 19) 정희수, 최강원, 김동선, 김채수, 1997, 한국 서해안 시화호의 오염현황과 환경개선방안, *환경정책연구*, 12, 123-163.
 - 20) 최정훈, 김계영, 홍대벽, 2000, 배수갑문 운용에 따른 시화호의 수온과 염분 변화, *한국지구과학회지*, 21(5), 541-552.
 - 21) 최정훈, 김미옥, 2001, 시화호 배수갑문 운용에 따른 용존산소와 pH 변화, *한국지구과학회지*, 22(3), 195-207.
 - 22) 김종구, 김준우, 조은일, 2002, 시화호의 배수갑문 운용에 따른 수질변화, *한국환경과학회지*, 11(12), 1205-1215.
 - 23) Nakata K., Taguchi K., 1982, Numerical simulation of eutrophication process coastal bay by eco-hydrodynamic model. (2) Ecological modeling, *Bull. Nat. Res. Inst. of Pollution and Resources*, 12(3), 17-36.
 - 24) 한국수자원공사, 1998, 시화호 수질관리대책수립 연구.
 - 25) 환경부, <http://www.me.go.kr>, 한강외수계 호소 수질현황(1999~2000).
 - 26) 해양수산부, 2001, 환경관리해역 시범해역관리 시행계획 수립연구, 269pp.