한국해안 · 해양공학회논문집
제 23 권 제 5 호, pp. 358~368, 2011년 10월

영양염 증가에 따른 부유생태계 반응 모의: FVCOM을 이용한 중형폐쇄생태계 (Mesocosm) 자료 재현

Modeling the effect of nutrient enrichment on the plankton population: Validation using mesocosm experiment data

송용식* · 최희선* · 유상철* · 홍현표** · 서지호*** · 이효진* · 김태인* · 우승범*** · 최중기***
Yong Sik Song, HeeSeon J. Choi, Sang Cheol Yoo, Hyeon Pyo Hong, Ji Ho Seo, Hyo Jin Lee, Tae In Kim, Seung-Buhm Woo and Jung Ki Choi

요 지 : FVCOM을 이용하여 시화호의 부영양화 메소코즘 내 부유생태계 변화 현장실험 결과를 재현하였다. 용존산소는 부영양화된 연안의 지화학생태 반응 결정에 중요한 역할을 하는 요소이나 FVCOM에서는 이를 모의하지 않아 용존산소 모듈을 추가하였으며, 그 적용성을 확인하였다. 수질생태 관련 상태변수를 영양염, 식물플랑크톤(극미소, 미소, 소형), 동물플랑크톤(원생동물 2군, 중형동물플랑크톤), 쇄설성 유기물, 용존성 유기물, 박테리아 그룹으로 설정하고 경기만과 시화호에서 측정된 생물군 간 먹이 상관관계 자료를 기반으로 모델을 구성하였다. 영양염 증가에 따른 메소코즘 내 크기별 식물플랑크톤의 변화 특성과 실험 초기에 나타나는 < 20 ㎛ 빈섬모충류 우점에서 scuticociliates로의 원생동물 천이 양상 등을 재현할 수 있었으며, 박테리아와 저산소의 영향을 파악하였다.

핵심용어 : FVCOM, 생태계 모델, 영양염, 시화호, 메소코즘

Abstract : Responses of plankton populations to nutrient enrichment in mesocosm experiments in Shihwa lake were simulated using FVCOM. Dissoloved oxygen module was added to the FVCOM to simulate impacts of its decreased levels. The ecological model included the major components of the pelagic ecosystem including nutrients, phytoplankton (pico-, nano-, micro-), zooplankton (two groups of protozoa, mesozooplankton), particulate organic matter, dissolved organic matter and bacteria, and was calibrated using trophodynamic data collected from Gyeonggi Bay and Shihwa Lake. The model was able to reproduce major responses of plankton populations to nutrient enrichment, including phytoplankton of different size groups, change of dominance of protozoa from < 20 μm oligotrichs to scuticociliates, and reponses to bacteria and low levels of dissolved oxygen in water column of the mesocosms.

Keywords : FVCOM, ecological modeling, nutrient enrichment, mesocosm, Shihwa Lake

1. 서 론

연안에서의 인간 활동과 개발에 따른 환경과 생태계 영향에 대해서는 지난 세기 동안 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 최근 한 지역에서 다양한 개발 사업이 동시에 진행되는 경우가 빈번하고 개발의 규모도 대형화되는 추세에 있어 연안 환경 및 생태계 관리 측면에서 개발에 따른 영향을 복합적이고 정량적으로 평가할 수 있는 방안으로 다양한 물리, 지화학, 생물적 요인들 간의 복잡한 상호관계를 수치적으로 연계하여 생태계의 변화를 모의하는 생태계모델에 대한 필요성이 급격히 증가하는 추세에 있다.

생태계모델로는 Chen(1970)에 의해 사용된 부영양화 모델 이후 최근 수십 년간 다양한 예측 모델이 개발되고 적용되어 왔다(Jørgensen, 2009). 국내에서도 식물플랑크톤의 증식 및 부영양화를 모의하기 위해 생태계모델이 적용된 바 있는데 (김 · 김, 2002; 김 등, 2002; 송 등, 2007; 이 등, 2008), 다양한 매개변수나 반응계수에 대한 실측자료의 부족으로 현장의 특성과 상이한 외국의 자료에 의존하여야 하는 한계점이 있다(송 등, 2007). 따라서 다양한 생태계모델을 개발, 적용하는 노력과 함께 모델의 예측력 향상을 위해 지역 생태계 특성에 대한 상세한 분석과 자료의 확보가 필요한 시점이라 할 수 있다.

*(주)지오시스템리서치(Corresponding author: Yong Sik Song, GeoSystem Research Corp., 1-40 Geumjeong-Dong, Gunpo-Si, Gyeonggi-Do, 435-824, Korea, yssong@geosr.com)
**(주)에코션(ECOCEAN Co. Ltd., 503 Industrial Technology R&D Center, 7-27, Songdo-Dong, Yeonsu-Gu, Incheon, 406-840, Korea)
*** 인하대학교 해양과학과(Department of Oceanography, College of Natural Science, Inha University)

시화호와 인천연안을 포함한 경기만에는 시화조력, 영종도 공항 등 다수의 개발 사업이 이미 진행되었거나 진행 또는 계획 중에 있어 이에 따른 생태환경의 변화에 많은 관심이 집중되고 있다. 이 해역에서는 식물플랑크톤의 대증식이 빈번히 관측되고 있으며(Choi and Shim, 1986; 양, 2001; 인하대학교 서해연안환경연구센터, 2002; 양·최, 2007), 특히 부영양화된 시화호의 경우 하계에는 저층 저산소환경이 빈번하게 형성되고 급격한 환경과 생물의 변동이 나타나는 역동적인 환경이다(최 등, 1997; 신 등, 2000; 김 등, 2002; 김 등, 2007; 백 등, 2010). 이 지역의 부유생태계의 변화는 구성요소 간 복잡한 'bottom-up' 조절기작과 'top-down' 조절기작이 연계되어 작용하는 것으로 알려져 있으며, 특히 환경조건에 따른 원생동물과 중형동물플랑크톤 포식압의 상대적 중요도 변화가 식물플랑크톤의 대번식 조절에 중요한 역할을 담당하는 것으로 밝혀졌다(신 등, 2000; 윤 · 최, 2003; 양 · 최, 2007; Seo and Choi, 2008; Yang et al., 2008; 유 등, 2010; Yang et al., 2010). 따라서 해당지역에서의 환경의 변화에 대한 부유생태계 반응의 예측력을 높이기 위해서는 동식물 플랑크톤 그룹을 세분화하여 모의하는 것이 필요하다.

FVCOM(Finite-Volume Coastal Ocean Model)에 포함된 생태모듈인 FBM(Flexible Biological Module)은 동식물플랑크톤, 영양염, 쇄설성 유기물, 용존성 유기물, 박테리아 등 먹이망의 기본 구조와 각 먹이 단계에서의 여러 종에 대한 분리 모의가 가능하다(Chen et al., 2006). 그러나 시화호와 같이 저산소층이 형성되는 해역에서는 용존산소 모의가 부유생태계 변동에 중요한 요소임에도 FVCOM의 생태모듈인 FBM은 이를 모의하지 않는 단점이 있다. 이에 본 연구는 FVCOM을 이용하여 경기만의 부유생태계 변동을 모의하기 위한 첫 단계로서 FVCOM 모델의 각 영양단계와 종별 관계 재현성 제시를 목적으로 2005년 시화호 내에서 영양염 증가에 대한 부유생태계 반응을 파악하기 위하여 수행된 메소코즘 현장실험의 결과(해양수산부, 2005)를 재현하였다. 메소코즘 실험의 경우 해수와 물질의 유통이 제한되기 때문에 생태계의 복합성을 유지하면서 새로운 개체군의 유입이나 기존 개체군의 유실이 없이 실험 시작 시점의 생물 개체군을 따라 변화양상을 추적할 수 있다. 따라서 개방된 자연 상태보다 환경 변화에 따른 생물의 반응과 생물간 관계 변화 양상에 대한 파악이 용이하여(Oviatt, 1994; 김, 2001) 모델이 각 구성요소 간 관계를 잘 재현하는지 판단할 수 있는 좋은 기초 자료가 될 수 있다.

본 연구에서는 연안, 특히 시화호에서 중요한 요소로 작용하고 있는 용존산소(DO)를 모의하기 위해 기존의 FVCOM에 포함되지 않은 용존산소(DO) 모의 기능을 추가하고, 저산소 환경이 부유생물과 지화학적 반응에 영향을 미칠 수 있도록 모델을 개선하였다. 따라서 이를 고려하지 못하여 동물플랑크톤 천이 등의 중요한 반응을 재현하지 못했던 FVCOM 수질생태 모듈의 현지 재현성을 향상시켰다. 또한 개선된 모델을 사용하여 메소코즘 현지실험을 재현하고 모델결과와의 시계열 비교를 통하여 모델의 신뢰성을 확인하였다.

2. 방 법

2.1 메소코즘 현장실험

해양수산부(2005)는 2005년 8월 10일에 시화호 내측에 직경 1 m, 높이 6 m의 불투수성 비닐재질로 제작된 2개의 메소코즘을 설치하고 실험을 수행하였다. 전체 메소코즘 높이 중 5 m까지 생물을 포함한 현장해수 원수를 약 4 m^3 수용하였으며, 나머지 1 m는 공기 중에 노출되도록 설치하였다. 대조구 메소코즘에는 해수 이외의 물질을 첨가하지 않았으며(Case A), 부영양화의 영향을 측정하기 위한 메소코즘에는 해수 투입 직후 질산염(8.4 $gN \cdot m^{-3}$)과 인산염(1.33 $gP \cdot m^{-3}$)을 첨가하였다(Case B). 실험 기간은 성층이 형성되기 쉬운 하계이므로 성층 형성을 방지하고 표층과 저층의 수직혼합을 위하여 임펠러를 설치하고 실험 종료시까지 지속적으로 메소코즘 내 해수를 혼합하였다. 임펠러는 저층수를 흡입하여 상층으로 강제 관입시키는 장치이다. 최초의 시료 채집은 임펠러 작동 30분 후에 실시하였으며, 이후 1~4일 간격으로 총 10일 동안 시료를 채집하였다. 영양염, 엽록소, 식물플랑크톤과 원생생물 분석을 위한 시료는 니스킨 채수기를 이용하여 해수면하 2 m에서 채집하였고, 중형동물플랑크톤 시료는 개체 손상을 방지하기 위하여 다이아프램 펌프를 사용하여 해수면하 2 m에서 20 L의 해수를 채수하여 분석하였다.

2.2 모델 개요

메소코즘 재현을 위한 모델로 유한체적법을 사용하는 3차원 FVCOM의 수질생태 모듈인 FBM을 개선하여 사용하였다. FVCOM의 기본방정식은 연속방정식, 수평방향의 운동방정식, 열 및 염 보존방정식과 상태방정식 그리고 수질생태변수에 대한 물질보존방정식으로 구성되어 있으며, 유체정역학적 가정과 Boussinesq 근사를 사용한다. 수평방향으로는 비구조격자망을, 수직방향으로는 시그마 층을 사용한다. 난류마감모델로는 Mellor and Yamada level-2.5 모델을 사용한다(Mellor and Yamada, 1982; Galperin et al., 1988). FVCOM의 수질생태 모듈인 FBM은 기본적으로 영양염, 쇄설성 유기물, 용존성 유기물, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 박테리아 그룹으로 구성되는데(Fig. 1), 각 그룹은 세부 상태변수들로 이루어져 있다. 수질생태변수의 변화를 표현하는 물질보존 방정식은 이류와 확산을 계산하는 염 보존방정식과 동일한 형태이나 FBM을 통하여 수질생태변수별 내부 생성소멸 즉 생지화학적반응을 고려한다. 상세한 모델 설명은 Chen et al.(2006)에 제시된 바와 같다.

시화호와 같이 부영양화된 많은 연안의 생태계에서는 용존산소의 변화가 중요한 변수로 작용할 수 있으나 FVCOM의 수질생태 모듈인 FBM에서는 용존산소를 모의하지 않는다. 용

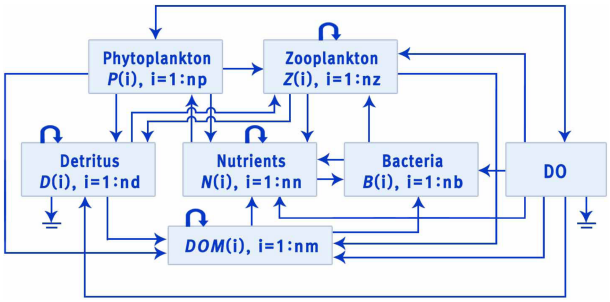


Fig. 1. Flow diagram showing the structure of the ecological model of FVCOM.

존산소는 육상 및 해양수질을 정량적으로 평가할 수 있는 주요 지표로 사용되며, 용존산소가 감소하여 저산소환경이 나타날 경우 일부 저서생물이 폐사하고 부유생물들이 혐기성환경에서 나타나는 종들로 천이되는 등의 생태계 변화가 나타난다. 이에 본 연구에서는 FVCOM에 지화학적 반응과 연계되어 용존산소의 농도를 모의할 수 있도록 모듈을 추가하였고, 시화호에서 나타나는 저산소 환경이 생물에 미치는 영향을 모의할 수 있도록 모델을 개선하였다(2.3절).

2.3 용존산소 모듈

본 연구에서 FVCOM의 수질생태모듈에 추가한 용존산소의 물질수지 및 반응기작은 Park et al.(1995)의 용존산소 기작을 기본으로 하였으며, Park et al.(1995)에서 고려하지 않은 동물플랑크톤 및 박테리아와의 관계를 Fig. 2와 같은 체계로 정의하였다. 용존산소의 농도는 식물플랑크톤의 광합성과 대기로부터의 재폭기(reaeration)로 인하여 증가하고 식물플랑크톤, 동물플랑크톤의 호흡, 질산화작용, 용존 유기탄소(DOC)의 분해, 퇴적물의 산소요구량(SOD)에 의하여 감소하며, 이는 아래의 식(1)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial DO}{\partial t} = \text{PHOTOS} + \text{REAR} - \text{RSP} - \text{SOD} - \text{NIT} - \text{HRSP} \quad (1)$$

여기서, DO는 용존산소의 농도, PHOTOS는 광합성에 의한 산소 생성, REAR은 해표면으로부터의 재폭기에 의한 산소 생성, RSP는 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 호흡에 의한 산소 소비, SOD는 퇴적물의 산소요구량, NIT는 질산화작용에 의한 산소 소비, HRSP는 용존유기탄소의 분해에 의한 산소 소비이며, 이는 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

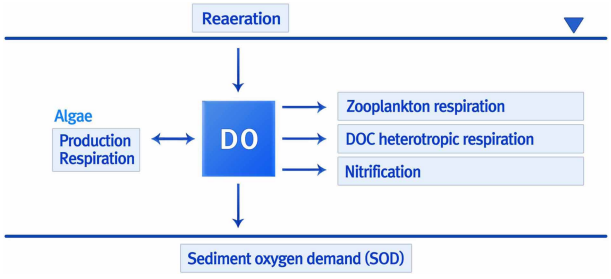


Fig. 2. Schematic process of DO dynamics.

$$\text{PHOTOS} = \sum_p ((1.3 - 0.3PN_p)GR_p)AOCR \times P_p \quad (2)$$

$$\text{REAR} = K_r(DO_s - DO) \quad (3)$$

$$\text{RSP} = \sum_p \left((1 - FCD_p)\frac{DO}{KHR_p + DO}BM_p\right)AOCR \times P_p + \sum_z (Kr_z)AOCR \times Z_z + \sum_b (Kr_b)AOCR \times B_b \quad (4)$$

$$\text{SOD} = \frac{sod}{\Delta z} \quad (5)$$

$$\text{NIT} = \text{AONT} \times K_{NIT}NH_4 \quad (6)$$

$$\text{HRSP} = \text{AOCR} \times K_{HR}\text{DOC} \quad (7)$$

where

DO : dissolved oxygen concentration

PN_p : preference for ammonium uptake by algal group p ($0 \le PN_p \le 1$)

GR_p : growth rate of algae

AOCR : DO to carbon ratio in heterotrophic respiration

p, z, b : algal-, zooplankton- and bacteria group index, respectively

P_p, Z_z, B_b : algal-, zooplankton- and bacteria group concentration, respectively

K_r : reaeration coefficient

DO_s : DO saturation concentration

FCD_p : fraction of basal metabolism exuded as DOC

KHR_p : half-saturation constant of DO for DOC excretion by algal group p

BM_p : basal metabolism (respiration and excretion) rate of algal group p

Kr_z : respiration rate of zooplankton group z

Kr_b : respiration rate of bacteria group b

sod : sediment oxygen demand

ΔZ : layer thickness

AONT : mass of DO consumed per unit mass of ammonium nitrogen nitrified

K_{NIT} : nitrification rate

NH_4 : concentration of ammonium nitrogen

DOC : dissolved organic carbon concentration

K_{HR} : heterotrophic respiration rate

산소의 발생과 소모에 대한 기작별 반응은 부록에 상세히 제시하였다.

저산소 또는 무산소 환경에서는 동물플랑크톤 일부 종의 폐사율이 증가할 수 있다. 이를 반영하기 위하여 동물플랑크톤의

폐사율은 용존산소의 함수로 정의되며, 모델내에서 다음과 같이 계산하였다.

$$\varepsilon = \alpha + \varepsilon_0,\ \alpha = \exp\ [\kappa(DO_{CRT} - DO)] - 1 \quad (DO < DO_{CRT}) \quad (8)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \quad (DO \geq DO_{CRT}) \quad (9)$$

where,

ε : mortality rate

ε_0 : basal mortality rate

DO_{CRT} : DO criteria for mortality

κ : motality rate coefficient

DO_{CRT}는 저산소 환경에서 동물플랑크톤의 사망률이 증가하기 시작하는 용존산소의 임계농도로서 용존산소의 농도가 DO_{CRT} 보다 작아지거나 κ가 증가할수록 사망률이 증가한다. DO_{CRT}와 κ에 대한 민감도를 Fig. 3에 제시하였다.

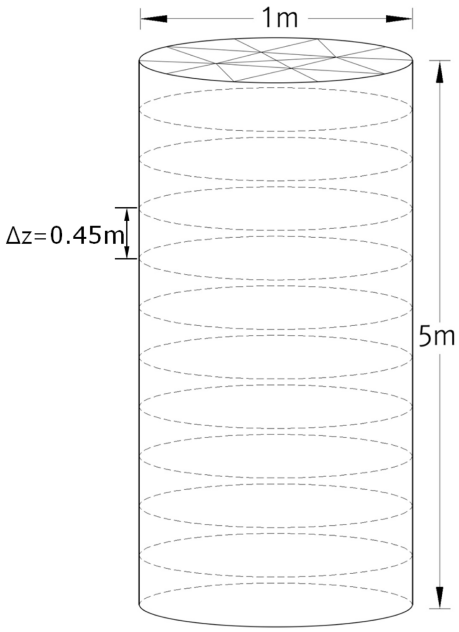


Fig. 4. Model domain.

2.4 모델 적용

2.4.1 물리적 조건

본 연구에서는 비구조 격자망을 사용하여 지름 1 m, 깊이 5 m의 메소코즘 실험구를 구성하였다. 수직적으로는 등간격인 11개의 층으로 설정하였고 수평적으로는 삼각격자를 사용하였다. 수평격자간격은 0.24~0.36 m로 해상되어 총 16개의 절점과 33개의 요소로 구성되었다(Fig. 4). 임펠러를 사용하여 강제로 수직 혼합시킨 메소코즘 현장실험 환경을 재현하기 위하여 배경 수직난류확산계수를 10^{-3} m^2/s로 설정하고 쇄설성 유기물과 동·식물 플랑크톤의 침강속도를 0 m/s로 설정하여 강제 수직혼합 환경을 설정하였다.

메소코즘 현장실험은 외부와의 해수와 물질의 이동이 제한되는 상태이므로 모델에서도 외부와의 해수 및 물질교환이 없도록 하였다. 메소코즘 현장실험기간 동안 수온은 26.9~28.7°C로 일정한 수준을 유지하였으며, 모델에서는 대기와의 열교환을 고려하지 않고 초기조건으로 지정한 27°C를 지속적으로 유지하도록 하였다. 해표면을 통한 산소의 재폭기(reaeration)는 해수 흐름, 풍속 등의 영향을 받는데 메소코즘 현장실험은 외부와의 해수교환이 차단되어 해수 흐름이 없고 외부 물질의 유입을 차단하기 위하여 메소코즘 현장실험장치의 상층부에 보호덮개를 설치하였으므로 바람의 영향도 받지 않는 조건이었다. 따라서 모델에서는 산소교환계수($(K_L)_{min}$)를 Hydroscience Inc.(1971)에 의해 제시된 0.6~1.0 $mday^{-1}$ 범위중 최소값인 0.6 $mday^{-1}$로 설정하였으며, 이를 실험기간 동안 동일하게 적용하였다.

2.4.2 수질 · 생태계 조건

FVCOM의 수질생태 모듈인 FBM은 기본적으로 영양염, 쇄설성 유기물, 용존성 유기물, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 박

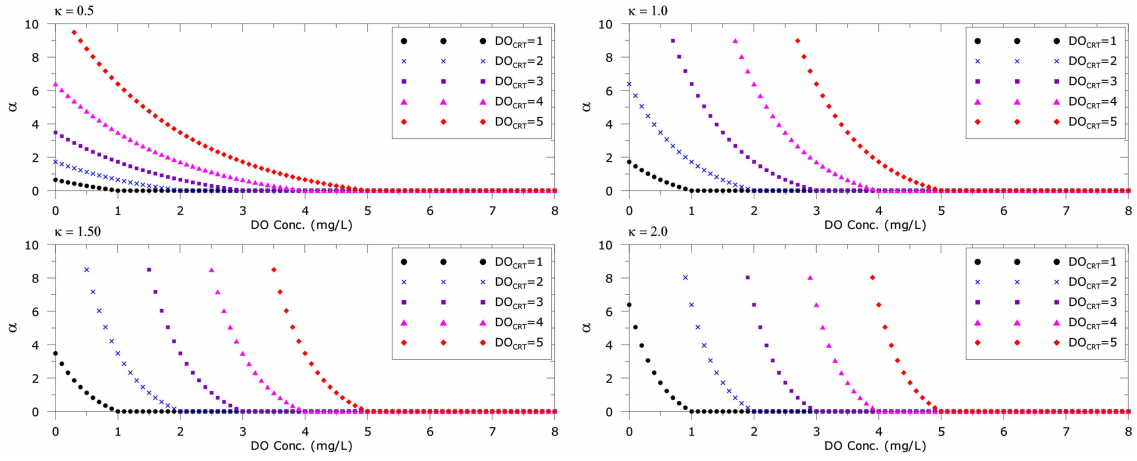


Fig. 3. Sensitivity of according to different DO, DO_{CRT} and κ values.

테리아 그룹으로 구성되는데, 영양염은 질산염, 암모니아, 인산염, 규산염, 쇄설성 유기물은 탄소, 질소, 인, 규소, 용존성 유기물은 탄소, 질소, 인으로 구분된다. 또한 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 박테리아는 각각 여러 종으로 구분하여 모의할 수 있다. 이러한 다양한 상태변수를 모두 모의할 수도 있고 사용자가 특정 상태변수만을 선택할 수도 있다. 즉 대상으로 하는 시스템의 특징과 가용한 자료를 고려하여 상태변수를 선택하고 각 상태변수들의 연결 관계를 정의할 수 있다. Fig. 5에 본 연구에서 사용한 상태변수와 각 변수들간의 관계를 제시하였다. 식물플랑크톤은 크기별로 극미소(pico, < 3 μm), 미소(nano, 3~20 μm), 소형(micro, > 20 μm)으로 분류하였고, 동물플랑크톤은 원생동물(protozoa)과 중형동물플랑크톤(mesozooplankton)으로 구성하였다. 원생동물은 실험기간 동안 뚜렷한 천이가 나타난 우점 분류군인 20 μm 미만의 빈섬모충류(Protozoa 1)와 scuticociliates(Protozoa 2)로 구분하여 모의하였다. 중형동물플랑크톤은 요각류, 야광충, 따개비 유생, 다모류 유생, 연체동물 유생을 포함하나, 실험기간 중 요각류 성체와 유생이 전체 중형 동물플랑크톤의 90% 이상을 차지하는 극우점 현상을 보여 전체를 단일 종으로 고려하였다.

수질생태변수의 초기 조건은 메소코즘 현장실험의 초기 측정치를 사용하였으며, 메소코즘 현장실험에서 측정되지 않은 박테리아는 백 등(2010)이 시화호에서 측정한 평균값을 사용하였다(Table 1). Case A는 대조구 메소코즘을 재현하는 실험안으로서 해수 이외의 물질을 첨가하지 않았기 때문에 질산염과 인산염의 초기 농도가 주변 해수의 농도와 동일하며, 인위적으로 부영양화 환경을 설정하는 Case B에는 질산염과 인산염의 초기농도를 높게 설정하였다(Table 1). Case B에서 질산염과 인산염의 초기 농도는 대조구(Case A)에 비하여 각각 111배와 62배 수준이다. 항목에 따라 대조구와 실험구의 초기 농도가 다소 차이를 보이는 경우도 있었으나 실험과정 중 변화하는 범위에 비해 상대적으로 작게 나타났다. 따라서 모델의 초기조건으로 각 메소코즘 현장실험구의 초기 값을 사용하였다(Table 1).

식물플랑크톤은 chl-a 대 탄소비(80)를 적용하여 chl-a 측정치로부터 탄소 생체량으로 환산하였다(Bowie et al., 1985). 원생동물 중 빈섬모충류의 생체량은 기하학 공식에 따라 개체의 부피를 측정한 후 Putt and Stoecker(1989)에 의해 제시된

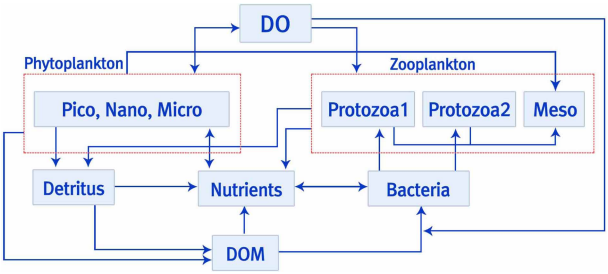


Fig. 5. Simplified flow diagram showing the structure of the ecological model for this study.

Table 1. Initial condition for the water quality and biological state variables

Parameter		Unit	Case A	Case B
Nutrient	NO_3	mg N L^{-1}	7.60×10^{-2}	8.47×10^{0}
	NH_4	mg N L^{-1}	0.31×10^{-2}	2.23×10^{-2}
	SiO_3	mg Si L^{-1}	3.67×10^{-1}	4.23×10^{-1}
	PO_4	mg P L^{-1}	2.14×10^{-2}	1.32×10^{0}
Dissolved Oxygen		mg O_2 L^{-1}	7.0	7.0
Phytoplankton	Picoplankton	mg C L^{-1}	9.80×10^{-1}	4.10×10^{0}
	Nanoplankton	mg C L^{-1}	2.58×10^{0}	1.52×10^{0}
	Micorplankton	mg C L^{-1}	7.48×10^{0}	5.07×10^{0}
Zooplankton	Protozoa 1	mg C L^{-1}	9.18×10^{-4}	5.71×10^{-3}
	Protozoa 2	mg C L^{-1}	9.18×10^{-5}	5.71×10^{-4}
	Meso-zoo	mg C L^{-1}	1.78×10^{-1}	1.03×10^{-1}
Bacteria		mg C L^{-1}	1.47×10^{-1}	1.47×10^{-1}
DOM	DON	mg N L^{-1}	3.37×10^{-1}	2.81×10^{0}
	DOC	mg C L^{-1}	4.74×10^{0}	4.15×10^{0}
	DOP	mg P L^{-1}	2.37×10^{-3}	7.05×10^{-2}
Detritus	N	mg N L^{-1}	1.77×10^{-1}	2.78×10^{-1}
	Si	mg Si L^{-1}	9.05×10^{-1}	1.33×10^{0}
	C	mg C L^{-1}	9.87×10^{-1}	1.46×10^{0}
	P	mg P L^{-1}	5.58×10^{-2}	3.48×10^{-2}

단위부피당 탄소량인 0.19 pgC μm^{-3}을 적용하여 추정하였다. 20 μm 미만의 빈섬모충류(protozoa 1)와 scuticociliates (protozoa 2)의 개체당 부피는 각각 2,322 μm^3 $cell^{-1}$과 6,283 μm^3 $cell^{-1}$로 측정되었으므로 개체당 탄소량은 각각 441 pgC $cell^{-1}$과 1,194 pgC $cell^{-1}$로 적용하였다. 중형동물플랑크톤의 초기 생체량은 경기만에서 식물플랑크톤과 중형동물플랑크톤 생체량의 평균적인 비인 61.9 : 18.7(Choi, 2010)을 적용하여 식물플랑크톤의 생체량으로부터 환산하였다. 박테리아의 생체량은 개체수로부터 Lee and Fuhrman(1987)의 변환 값인 19.8 fgC $cell^{-1}$을 사용하였다. 모델에 사용된 주요 계수를 Table 2에 제시하였다. 기초 연구자료가 없는 DO_{crt} 등의 계수들은 보정과정을 통하여 결정하였다.

3. 결과 및 토의

영양염을 투입하지 않은 실험(Case A)과 영양염을 첨가한 실험(Case B)에 대한 실측치와 모델링 결과 시계열을 Fig. 6에 제시하였다. Fig. 6에는 표층에 대한 모델결과가 제시되었으나 인위으로 표·저층간의 수직확산을 크게 설정하였으므로 모델결과에서 표층과 저층의 차이는 나타나지 않았다. 메소코즘 현장실험 자료를 사용하여 보정된 모델링 결과는 부유생태계 구성 요소인 영양염, 용존산소, 식물플랑크톤, 동물플랑크

Table 2. Main parameters used for FVCOM simulation of mesocosm experiments

Parameter	Definition	Value	Unit	Reference
CHL2C	chlorophyll to carbon ratio	0.40	-	Bowie et al., 1985
R_P_1	respiration rate for picoplankton	0.10	day^{-1}	Kim et al., 2010
R_P_2	respiration rate for nanoplankton	0.05	day^{-1}	Kim et al., 2010
R_P_3	respiration rate for microplankton	0.05	day^{-1}	Kim et al., 2010
$UMAX_1$	maximum growth rate for picoplankton	0.99	day^{-1}	Bierman and Dolan, 1981
$UMAX_2$	maximum growth rate for nanoplankton	1.50	day^{-1}	Bierman and Dolan, 1981
$UMAX_3$	maximum growth rate for microplankton	3.50	day^{-1}	Bierman and Dolan, 1981
UBMAX	maximum growth rate for bacteria	10.5	day^{-1}	calibrated
MPD_1	mortality rate for picoplankton	0.46	day^{-1}	Shen, 2006
MPD_2	mortality rate for nanoplankton	0.46	day^{-1}	Shen, 2006
MPD_3	mortality rate for microplankton	0.46	day^{-1}	Shen, 2006
R_Z_1	respiration rate for protozoa 1	0.05	day^{-1}	Kim et al., 2010
R_Z_2	respiration rate for protozoa 2	0.05	day^{-1}	Kim et al., 2010
R_Z_3	respiration rate for mesozooplankton	0.05	day^{-1}	Kim et al., 2010
G_MAX_1	maximum grazing rate of ptotozoa 1 on bacteria	10.0	day^{-1}	calibrated
G_MAX_2	maximum grazing rate of ptotozoa 2 on bacteria	3.50	day^{-1}	Hamilton and Preslan, 1970
G_MAX_3	maximum grazing rate of mesozooplankton on phytoplankton	0.2	day^{-1}	Yang et al., 2010
R_B	bacteria respiration rate half saturation constant for nitrogen	0.05	day^{-1}	Shen, 2006
KHN	uptake for algae	0.01	mgL^{-1}	Cerco and Cole, 1994
$KHOR_{DO}$	half saturation constant of DO for oxic respiration	0.5	mgL^{-1}	Cerco and Cole, 1994
KT_r	temperature influence coefficient on reaeration	1.024	-	Thomann and Mueller, 1987
$(K_L)_{min}$	oxigen exchange coefficient	0.60	$mday^{-1}$	Hydroscience Inc., 1971
DO_{crt}	DO criteria for mortality	4.48	mgL^{-1}	calibrated
k	mortality rate coefficient	2.00	-	calibrated

톤 각 그룹의 시간에 따른 변화 특성과 원생동물의 종 천이를 잘 재현하고 있다고 판단된다.

3.1 식물플랑크톤 변동

실험 기간 중 대조구(이후 Case A)와 영양염 첨가구(이후 Case B) 간의 차이는 식물플랑크톤에서 가장 뚜렷하게 나타났다. 영양염 첨가구(Case B)에서는 소형과 미소 식물플랑크톤이 실험시작 후부터 약 5일까지 급격하게 증가하며, 이후 영양염의 농도가 낮아지면서 성장률 감소에 따른 생체량의 감소가 나타났다. 반면 실험기간 중 대조구의 식물플랑크톤은 초기와 유사하거나 약간 감소하는 경향을 보였다. 영양염 농도 외에 중형 동물플랑크톤과 원생생물의 포식압도 식물플랑크톤의 생체량 변화에 중요한 영향을 미칠 수 있는 요소로, 경기만과 시화호에서 원생동물과 중형 동물플랑크톤인 요각류는 식물플랑크톤 생산의 60~70% 이상을 소모할 수 있는 것으로 밝혀졌다(해양수산부, 2005; Yang et al., 2008, 2010). 그러나 실험기간 중 메소코즘 내 이들 동물플랑크톤이 소형이나 미소 식물플랑크톤 생체량에 미치는 영향은 실험 전반기에만 중요한 역할을 한 것으로 판단된다. 그 이유는 실험 시작부터 비교적 크기가 큰(> 20 μm) 식물플랑크톤을 섭식하는 요각류(Gaudy et al., 1996; Gretchen et al., 2003; Li et al., 2008; Yang et al., 2010)가 지속적으로 감소하였고 실험기간 중 우점한 원생동물은 크기가 20~30 μm 이하로 극미소 식물플랑크톤을 주로 섭식하기 때문이다(Sherr and Sherr, 1994; 양과 최, 2003; Yang et al., 2008). 원생동물의 섭식 영향은 실험 초기 20 μm 미만의 빈섬모충류(Protozoa 1)의 성장에 따라 극미소 식물플랑크톤이 급격하게 감소하는 결과로 나타났다. 극미소 식물플랑크톤은 이후 생체량을 회복하지 못하고 실험기간 동안 매우 낮은 양을 유지하였다.

3.2 동물플랑크톤 변동

메소코즘 현장실험 기간 중 가장 우점한 원생동물은 섬모충류 중 < 20 μm oligotrichs(빈섬모충류, Protozoa 1)와 scuticociliates(Protozoa 2)로 시화호에서 하계에 우점하는 분

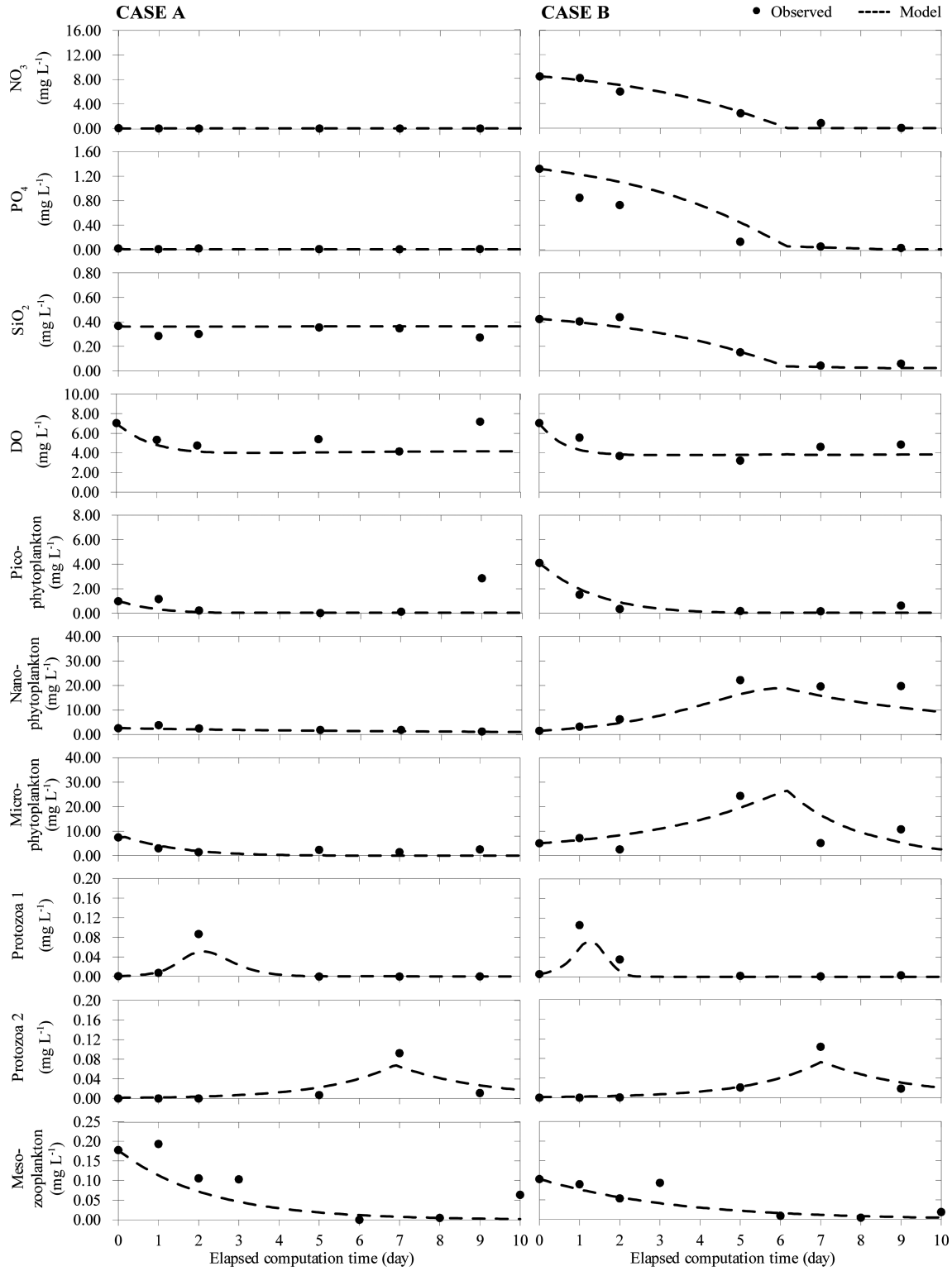


Fig. 6. Comparison of modeling results and mesocosm experiment data(Cases A and B).

류군으로 보고되어 있다(해양수산부, 2006, 2007). 이와 같은 미소형 섬모충류의 우점현상은 수괴의 부영양화와 관계가 있는 것으로 알려져 있는데(Beaver and Crisman, 1982; Urrutxurtu et al., 2003), 이는 미소형 섬모충류는 먹이원이 충분할 경우 매우 빠른 속도로 분열하기 때문이다(Turley et al., 1986).

식물플랑크톤과 달리 < 20 μm oligotrichs(빈섬모충류)는 Case A와 Case B에서 모두 실험시작 후 1~2일까지 증가한 후 다시 급격히 감소하고, scuticociliates는 점진적으로 증가하다가 실험 7일째 최대를 보인 후 다시 감소하는 양상을 보였다. 단, Case B에서 Case A보다 빈섬모충류의 성장이 약간 빠르게 일어났는데 이는 Case B에서 빈섬모충류의 먹이가 되는 극미소 식물플랑크톤의 성장이 빠르게 일어난 점과 관련이 있는

것으로 볼 수도 있다. 그러나 모의기간 중 나타난 극미소 플랑크톤의 양이 적었고, 극미소 식물플랑크톤이 감소한 이후에도 scuticociliates가 급성장하였기 때문에 극미소 플랑크톤 외에 다른 먹이원이 존재할 것으로 추측된다. 일반적으로 크기가 작은 빈섬모충류나 scuticociliates는 작은 크기의 식물플랑크톤 외에 박테리아를 먹이원으로 사용하는 것으로 알려져 있으며(Sherr et al., 1986; Sherr and Sherr, 1994; Ayo et al., 2001), 시화호와 경기만에서도 박테리아가 섬모충류의 주요 먹이원이 될 수 있음이 보고된 바 있다(양 등, 2003; 백 등, 2010). 본 모델에서도 박테리아를 원생동물의 먹이원으로 설정하였으며, 모델결과로부터 빈섬모충류와 scuticocilates의 성장 및 종의 천이를 확인할 수 있었다. 이와 같이 경기만과 시화호의 부유 생태계에서 박테리아 역할의 중요성을 고려할 때 향후 생태계 모델 적용의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 박테리아에 대한 조사가 필요할 것으로 사료된다.

극미소 식물플랑크톤과 박테리아를 먹이로 성장한 빈섬모충류가 감소한 원인은 먹이원의 감소, 중형동물플랑크톤(요각류)의 포식, 저산소에 따른 사망을 들 수 있다. 먹이원인 극미소 식물플랑크톤의 감소와 박테리아의 감소는 실측 자료와 모델결과로 확인되었다. 중형동물플랑크톤의 우점군인 요각류는 일반적으로 식물플랑크톤보다 동물플랑크톤을 선호하는 것으로 알려져 있다. 그러나 크기나 생체량, 구성에 따라 선호도가 변화하여 15~20 μm 보다 작은 크기의 생물에는 선호도가 감소한다(Hansen et al., 1994; Yang et al., 2010). 따라서 $<20\ \mu$m 빈섬모충류는 요각류로부터 섭식이 가능하더라도 크게 선호되는 먹이는 아니었을 것으로 판단된다. Scuticociliates의 경우는 크기가 $20 \times 30\ \mu$m 정도로 요각류가 선호하는 크기에 좀 더 가까울 수 있다. 그러나 scuticociliates가 우점한 시기(모델시작 후 6~10일)에는 요각류의 밀도가 ND~4 indsL^{-1}로 포식압이 크게 영향을 미치지 못하였던 것으로 보인다.

모델실험 초기에 $<20\ \mu$m 빈섬모충류가 증가한 후 다시 감소하고 모델실험 후반부에 scuticociliates가 증가하는 군집 천이 양상에는 용존산소 농도가 중요한 역할을 한 것으로 보인다. 용존산소의 농도는 Case A와 Case B 모델실험 모두에서 급격히 감소하여 실험 3~8일째 최저농도(2~4 mgL^{-1})를 나타낸다. 이는 정도의 차이는 있지만 두 가지 조건 모두 부영양화된 환경으로 유기물 산화에 소모되는 산소의 요구량이 많은 반면에 해수면으로부터 산소를 유입시키는 재폭기 기작이 매우 약하기 때문인 것으로 보인다. 그 결과 용존산소의 농도가 지속적으로 낮은 값을 유지하였다. 미국 Chesapeake 만의 경우 산소 공급이 이루어지는 수층에서는 빈섬모충류가 우점한 반면에 산소농도가 감소할수록 scuticociliates가 우점하는 것으로 나타났다(Dolan and Coats, 1991). 메소코즘 현장실험에서도 실험 초기 산화환경에서는 $<20\ \mu$m 빈섬모충류가 우점하고, 실험후기 저산소 환경에서는 scuticociliates가 우점하여 scuticociliates는 빈섬모충류에 비해 저산소 환경에 잘 적응하는 분류군인 것으로 판단되며, 모델실험에서 이러한 환경변화에 따른 종의 천이를 잘 재현하였다.

본 연구는 개선된 용존산소 모듈을 포함한 FVCOM의 전체 수질생태 모듈이 생지화학적 반응을 현실적으로 모의할 수 있는지를 평가하기 위하여 기존에 연구된 메소코즘 현장실험 자료를 모델의 검정자료로 활용하였다. 메소코즘 현장실험 장치는 외부와의 물질교환이 차단되었고 강제로 수직 혼합되어 3차원적인 공간 변화가 없는 인위적인 환경이었다. 실제 해양환경은 다양한 물리적인 외력들과 생지화학적 반응으로 인하여 3차원적인 수질생태 변화가 나타난다. 따라서 향후 본 연구에서 개선된 모델을 실제 해역에 적용하여 3차원적인 수질생태 특성을 재현할 계획이다.

4. 결 론

본 연구에서는 FVCOM을 이용하여 영양염 증가에 의한 동식물 플랑크톤 변화를 관찰한 메소코즘 현장실험 결과를 재현하였다. 시화호와 경기만 부유 생태계의 먹이망 관계를 고려하여 식물플랑크톤을 크기별로 3개의 군으로, 동물플랑크톤을 3개의 군으로 구분하였고, 영양염(질산염, 암모니아, 인산염, 규산염), 쇄설성 유기물(탄소, 질소, 인, 규소), 용존성 유기물(탄소, 질소, 인)로 모델을 구성하였다. FVCOM에 포함되지 않은 용존산소 모듈을 추가하여 수질·생태 모듈과 연계한 결과, 메소코즘 내 영양염 증가에 따른 식물플랑크톤의 변화가 잘 재현되었으며, 산소가 충분한 메소코즘 환경에서는 빈섬모충류가 우점하였고, 메소코즘 내에서 산소농도가 감소할수록 scuticociliates가 우점하는 동물플랑크톤의 종 천이도 재현할 수 있었다. 이와 같은 결과는 이미 시화호와 인근 경기만에 대한 생태 연구 자료를 충분히 활용할 수 있었기 때문인 것으로 판단된다. 향후 생태계 모델링의 필요성 증가에 따른 생태계 모델링 예측능력을 향상시키기 위한 노력으로 생태계 모델의 지속적인 개선, 개발뿐만 아니라 생태계 먹이망 관계 등 다양한 기초 연구 자료를 확보할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2011년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제명: 해수순환 및 생태계변화 예측기술개발).

참고문헌

김웅서 (2001). 해양생태계 연구를 위한 폐쇄생태계의 활용. 한국환경생물학회지, 19(3), 183-194.

김종구, 김양수 (2002). 새만금 사업지구의 연안해역에서 부영양화관리를 위한 생태계모델의 적용. I. 해역의 수질 특성 및 저질의 용출 부하량 산정. 한국수산학회지, 35(4), 348-355.

김종구, 김준우, 조은일 (2002). 시화호 배수갑문 운용에 따른

수질변화. 한국환경과학회지, 11(12), 1205-1215.
김형철, 최우정, 이원찬, 구준호, 이필용, 박성은, 홍석진, 장주형 (2007). 수질관리를 위한 시화호의 환경용량 산정. 한국환경과학회지, 16(5), 571-581.
백승호, 유카이, 박범수, 한명수 (2010). 시화호 주변 부영양화 기수유역의 미소생물 군집의 계절적 변화. 한국하천호수학회지, 43(1), 55-68.
송규민, 이상룡, 이석, 안유환 (2007). 생태계모델을 이용한 황해투기해역에서의 춘계 식물플랑크톤 대증식 연구. Ocean Polar Res., 29(3), 217-231.
신재기, 김동섭, 조경제 (2000). 시화호에서 무기영양염과 식물플랑크톤 동태. Kor. J. Limnol., 33(2), 109-118.
양은진 (2001). 인천 연안 미소형 및 소형 동물플랑크톤의 생태학적 연구. 박사학위 논문, 인하대학교. 286p.
양은진, 최중기 (2003). 경기만 수역에서 미세생물 군집의 계절적 변동 연구, II. 미소형 및 소형 동물플랑크톤. 한국해양학회지 바다, 8, 78-93.
양은진, 최중기 (2007). 인천 연안의 초가을 식물플랑크톤 대증식기에 식물플랑크톤과 종속영양 원생동물 군집의 단주기 변동. Ocean Polar Res., 29(2), 101-112.
양은진, 최중기, 현정호 (2003). 경기만 수역에서 미세생물 군집의 계절적 변동 연구, I. 박테리아와 종속영양 미소 편모류. 한국해양학회지 바다, 8, 44-57.
유정규, 명철수, 최중기, 홍현표, 김은수 (2010). 시화호 중형동물플랑크톤 군집의 시공간적 변동. Ocean Polar Res., 32(3), 187-201.
이인철, 윤석진, 김현주 (2008). 생태계모델을 이용한 동해 심층수 개발해역의 수질환경 변화예측. 한국해양공학회지, 22(2), 34-41.
인하대학교 서해연안환경연구센터 (2002). 서해연안환경연구센터 연구보고서. 426p.
해양수산부 (2005). 시화호 해양환경개선 사업. 617p.
해양수산부 (2006). 시화호 해양환경개선 연구용역. 755p.
해양수산부 (2007). 시화호 해양환경개선 사업. 686p.
최중기, 이은희, 노재훈, 허성회 (1997). 시화호와 주변해역 식물플랑크톤의 대증식과 일차생산력에 관한 연구. 한국해양학회지 바다, 2(2), 78-86.
Ayo, B., Santamaria, E., Latatu, A., Artolozaga, I., Azua, I. and Iriberri, J. (2001). Grazing rates of diverse morphotypes of bacterivorous ciliates feeding on four allochthonous bacteria. Lett. Appl. Microbiol., 33(6), 455-460.
Banks, R.B. and Herrera, F.F. (1977). Effect of wind and rain on surface reaeration. J. Environ. Eng. Div., ASCE, 103(EE3), 489-504.
Beaver, J.R. and Crisman, T.L. (1982). The trophic response of ciliated protozoans in freshwater lakes. Limnol. Oceanogr., 27(2), 246-253.
Bierman, V.J. Jr. and Dolan, D.M. (1981). Modeling of phytoplankton-nutrient dynamics in Saginaw Bay, Lake Huron. J. Great Lakes Res., 7(4), 409-439.
Bowie, G.L., Mills, W.B., Porcella, D.B., Campbell, C.L., Pagenkopf, J.R., Rupp, G.L., Johnson, K.M., Chan, P.W.M and Gherini, S.A. (1985). Rates, constants and kinetics formulations in surface water quality modeling (second edition). EPA/600/3-85/040, 455p.
Cerco, C.F. and Cole, T.M. (1993). Three-dimensional eutrophication model of Chesapeake Bay. J. Environ. Eng., 119(6), 1006-1025.
Cerco, C.F. and Cole, T.M. (1994). Three-dimensional eutrophication model of Chesapeake Bay. Technical Report EL-94-4, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
Chen, C.W. (1970). Concepts and utilities of ecological models. Proc. Am. Soc. Civ. Eng. J. San. Eng. Div., 96(SA5), 1085-1097.
Chen, C., Beardsley, R.C. and Cowles, G. (2006). An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model: FVCOM User Manual, Second Edition. SMAST/UMASSD, Technical Report-06-0620, 315p.
Choi, J.K. (2010). The grazing pressure of dominant copepods on phytoplankton and microbial food web in Gyeonggi Bay, the Yellow Sea. Proc. 2nd Yellow Sea Regional Science Conference. Xiamen, China, 24-26 Feb. 2010.
Choi, J.K. and Shim, J.H. (1986) The ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay, Yellow Sea. III. Phytoplankton composition, standing crops. tychopelagic plankton. J. Oceanogr. Soc. Korea, 21, 156-170.
Dolan, J.R. and Coats, D.W. (1991). Changes in fine scale vertical distributions of ciliate microzooplankton related to anoxia in Chesapeake Bay waters. Mar. Microb. Food Webs, 5(1), 81-93.
Galperin, B., Kantha, L.H., Hassid, S. and Rosati A. (1988). A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows. J. Atmos. Sci., 45, 55-62.
Gaudy, R., Pagano, M., Cervetto, G., SaintJean, L., Verriopoulos, G. and Beker, B. (1996). Short term variations in feeding and metabolism of *Acartia tonsa* (pelagic copepod) in the Berre lagoon (France). Oceanol. Acta., 19, 635-644.
Gretchen, C., Bollens, R. and Penry, D.L. (2003). Feeding dynamics of Acartia spp. copepods in a large, temperate estuary (San Francisco Bay, CA). Mar. Ecol. Prog. Ser., 257, 139-158.
Hamilton, R.D. and Preslan, J.E. (1970). Observations on the continuous culture of a planktonic phagotrophic protozoan. J. Exp. Mar. Biol. and Ecol., 5(1), 94-104.
Hansen, B., Bjørnsen, P.K. and Hansen, P.J. (1994). The size ratio between planktonic predators and their prey. Limnol. Oceanogr., 39, 395-403.
Hydroscience Inc. (1971). Simplified mathematical modeling of water quality, prepared for the Mitre Corporation and the USEPA, Water programs, Washington D.C., 127p.
Jørgensen, S.E. (2009). Ecological Modeling. An Introduction. WIT Press, Southampton, Boston. 188p.
Kim, T., Sheng, Y.P. and Park, K. (2010). Modelling water quality and hypoxia dynamics in upper Charlotte Harbor, Florida, U.S.A. during 2000. Estuar. Coast Shelf Sci., 90(4), 250-263.
Lee, S.H. and Fuhrman, J.A. (1987). Relationship between biovolume and biomass of naturally derived marine bacterioplankton. Appl. Environ. Microbiol. 53(6), 1298-1303.
Li, J., Sun S., Li, C., Zhang, Z. and Pu, X. (2008). Effects of different diets on the reproduction and naupliar development of the copepod *Acartia bifilosa*. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 355(2), 95-102.
Mellor, G.L. and Yamada, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem. Rev. Geophys. Space Phys., 20(4), 851-875.
Oviatt, C.A. (1994). Biological considerations in marine enclosure

experiments: challenges and revelations. Oceanography, Wash., 7(2), 45-51.

Park, K, Kuo, A.Y., Shen, J. and Hamrick, J.M. (1995). A three-dimensional Hydrodynamic-Eutrophication Model (HEM-3D): Description of water quality and sediment process submodels. Special Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering, No. 327., Virginia Institute of Marine Science, College of William and Mary.

Putt, M. and Stoecker D.K. (1989). An experimentally determined carbon: volume ratio for marine "oligotrichous" ciliates from estuarine and coastal waters. Limnol. Oceanogr., 34(6), 1097-1103.

Seo, J.H. and Choi, J.K. (2008). *In situ* grazing pressure of *Acartia hongi* female (Copepoda: Calanoida) on phytoplankton in Gyeonggi Bay, Korea. The Yellow Sea, 9(1), 32-39.

Shen, J. (2006). Optimal estimation of parameters for a estuarine eutrophication model. Ecological Modelling., 191, 521-537.

Sherr, E.B., Sherr, B.F., Fallon, R.D. and Newell. S.Y. (1986). Small, aloricate ciliates as a major component of the marine heterotrophic nanoplankton. Limnol. Oceanogr., 31(1), 177-183.

Sherr, E.B. and Sherr, B.F. (1994) Bacterivory and herbivory: key roles of phagotrophic protists in pelagic food webs. Microb. Ecol. 28(2), 223-235.

Thomann, R.V and Mueller, J.A. (1987). Principles of surface water quality modeling and control. Harper & Row, New York.

Turley, C.M., Newel,l R.C. and Robins D.B. (1986). Survival strategies of two small marine ciliates and their role in regulating bacterial community structure under experimental conditions. Mar. Ecol. Prog. Ser., 33, 59-70.

Urrutxurtu, I., Orive, E. and Sota, A. (2003). Seasonal dynamics of ciliated protozoa and their potential food in an eutrophic estuary (Bay of Biscay). Estuar. Coast. Shelf Sci., 57(5-6), 1169-1182.

Yang, E.J., Choi, J.K. and Hyun, J.H. (2008). Seasonal variation in the community and size structure of nano- and microzooplankton in Gyeonggi Bay, Yellow Sea. Estuar. Coast. Shelf Sci., 77(3), 320-330.

Yang, E.J., Ju, S.J. and Choi, J.K. (2010). Feeding activity of the copepod Acartia hongi on phytoplankton and micro-zooplankton in Gyeonggi Bay, Yellow Sea. Estuar. Coast. Shelf Sci., 88(2), 292-301.

원고접수일: 2011년 8월 25일
수정본채택: 2011년 9월 27일(1차)
2011년 10월 27일(2차)
게재확정일: 2011년 10월 13일

부록. 산소발생과 소모에 대한 기작별 반응식

광합성과 호흡에 의한 용존산소 발생 및 소비 계산시 식물플랑크톤에 의한 암모니아의 preference(PN_p)와 대사율(BM_p)이 사용되며, 이는 각각 다음과 같이 계산된다 (Cerco and Cole, 1993).

$$PN_p = NH_4 \frac{NO_3}{(KHN_p + NH_4)(KHN_p + NO_3)} + NH_4 \frac{KHN_p}{(NH_4 + NO_3)(KHN_p NO_3)} \quad (1)$$

$$BM_p = BMR_p \exp(KTB_p[T - TR_p]) \quad (2)$$

where,

NO_3 : concentration of nitrate nitrogen

KHN_p : half-saturation constant for nitrogen uptake for algal group p

BMR_p : basal metabolism rate at TR_p for algal group p

KTB_p : effect of temperature on basal metabolism rate for algal group p

T : water temperature

TR_p : reference temperature for basal metabolism rate for algal group p

용존산소의 포화농도는 다음과 같이 계산된다.

$$DOs = 14.5532 - 0.38217T + 5.4258\ 10^{-3}T^2 - 10^3 CL(1.665\ 10^{-4} - 5.866\ 10^{-6}T + 9.79610^{-8}T^2 \quad (3)$$

해수면에서의 재폭기 계수(reaeration coeffient)는 기상자료와 유속을 사용하여 계산되는 방법 (식 4) (Park et al., 1995; Thomann and Mueller, 1987; Banks and Herrera, 1977)과 전달계수를 사용하는 비교적 간단한 방법 (식 7) (Hydroscience Inc., 1971)을 선택적으로 사용할 수 있도록 하였다. 각각은 다음과 같이 계산된다.

$$K_r = \left(K_{ro}\left(\frac{u_{eq}}{H_{eq}}\right)^{1/2} + W_{REA}\right)\frac{1}{\Delta z} KT_r^{T-20} \quad (4)$$

$$\left(\frac{u_{eq}}{H_{eq}}\right)^{1/2} = \left(\frac{\sum(u_k B_k h_k)/\sum(B_k h_k)}{\sum(B_k h_k)/B_\eta}\right)^{1/2} \quad (5)$$

$$W_{REA} = 0.728U_W^{1/2} - 0.317U_W + 0.0372U_W^2 \quad (6)$$

$$K_r = \frac{(K_L)_{min} \times A}{V}(KT_r)^{T-20} \quad (7)$$

where,

K_{ro} : propotionality constant = 3.933 in MKS unit

u_{eq} : weighted velocity over a cross-section
H_{eq} : weighted depth over a cross-section
W_{REA} : wind-induced reaeration
KT_r : constant for temperature adjustment of DO reaeration rate
CL : chloride concentration in ppt (= S/1.80655)
u_k,B_k,h_k : velocity, width and depth of the k_{th} vertical layer, respectively
B_η : width at the free surface
U_w : wind speed in m sec^{-1} at 10 m above water surface
$(K_L)_{min}$: oxygen exchange coefficient
A : water surface area
V : water volume

용존유기탄소의 분해(heterotrophic respiration)에 의한 산소 소모는 용존산소 농도의 함수이며, 다음과 같이 계산된다 (Park et al., 1995).

$$K_{HR} = \frac{DO}{KHOR_{DO} + DO} K_{DOC} \quad (8)$$

$$K_{DOC} = (K_{DC} + K_{DCalg} \sum B_b) \exp(KT_{MNL}[T - TR_{MNL}]) \quad (9)$$

where,

K_{HR} : heterotrophic respiration rate
$KHOR_{DO}$: half-saturation constant of DO for oxic respiration
K_{DOC} : oxic respiration rate of DOC at infinite DO concentration
K_{DC} : minimum respiration rate of DOC
K_{DCalg} : constant relating respiration of DOC to algal biomass
KT_{MNL} : effect of temperature on mineralization of dissolved organic matter
TR_{MNL} : reference temperature for mineralization of dissolved organic carbon