

동경만의 생태계모델 결과와 위성자료의 비교연구

이성애^{1*} · 杉森康宏¹ · 김영섭²

Comparison Study between Results of Ecosystem Model and Satellite Data in the Tokyo Bay

Sung-Ae LEE^{1*} · Yasuhiro SUGIMORI¹ · Young-Seup KIM²

요 약

일본 동경만의 흐름양상과 생물플럭스의 분포특성을 역학-생태계모델을 통해 구현하고, 위성자료에서 얻어진 영상과 비교 분석하였다. 모델의 초기치와 경계치는 2001년 3월의 관측값들을 이용하였다. 운용된 모델 결과에서 얻어진 동경만의 흐름양상과 염분분포 등은 선행연구들과 대체로 일치하며 모델의 재현성을 어느 정도 신뢰할 수 있었다. NOAA/AVHRR에서 추정된 SST는 모델 결과에 비해 전체적인 분포양상은 아주 유사하였으나, 만입구에서 2.5°C 정도, 내만에서 0.5°C 정도 높게 추정되었다. 위성에서 얻어진 클로로필-a 분포는 모델결과의 식물플랑크톤분포와 그 양상이 비슷하나, 농도는 상당한 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 불일치에 관해서는 앞으로도 계속적인 연구가 수행될 예정이다.

주요어: 동경만, 생태계모델, SST, NOAA/AVHRR, SeaWiFS, 클로로필-a

ABSTRACT

The hydro-dynamical and ecological coupled model were applied in the Tokyo Bay, to evaluate the flow pattern including water quality parameters and the distribution of biomass flux, and to compare with the results obtained from the satellite data during March 2001. The flow pattern and salinity distribution obtained from the present model were nearly identical with those of the previous studies. SST from NOAA/AVHRR was 2.5°C higher than model results in the mouth of bay and 0.5°C lower than model results in the inner bay, respectively. It was found that the concentration of chlorophyll-a estimated from SeaWiFS was considerably higher than that of model result, regardless similar distribution pattern. This disagreement will be studied through the more elaborate investigation in the future.

KEYWORDS: Tokyo Bay, Ecological Model, SST, NOAA/AVHRR, SeaWiFS, Chlorophyll-a

2003년 11월 26일 접수 Received on November 26, 2003 / 2004년 2월 19일 심사완료 Accepted on February 19, 2004
1 일본 치바대학 환경리모트센싱센터 Center for Environmental Remote Sensing(CeReS), Chiba University
2 부경대학교 위성정보과학과 Department of Satellite Information Sciences, Pukyong National University
* 연락처자 E-mail: lsa@ceres.cr.chiba-u.ac.jp

서론

동경만은 일본의 중심부에 위치해 있고, 동쪽으로 쿠로시오 난류가 흐르고 있으며, 남쪽 입구만이 열려있는 반 폐쇄만이다(그림 2). 동경만은 많은 인구와 산업시설의 집중으로 연안 지역의 오염에 따른 부영양화로 어업피해가 발생되고 있다.

Unoki와 Kishino(1977)는 동경만의 오염상황을 알아보기 위하여, COD 농도의 분포를 조사하고, 만의 북서쪽에서 COD 농도가 높고 만 입구로 갈수록 낮아진다고 하였다. 또한 그들은, 만의 북서쪽에는 육지로부터의 영양염류 유입으로 생물활동이 높다고 하였다. 이러한 생물활동은 식물플랑크톤 분포 농도와 관련되어 있을 것으로 추측되나, 현장 관측의 어려움으로 인하여 정량적인 연구 결과는 드문 상태이다.

특정한 만과 같은 협소한 해역을 대상으로 영양염류와 식물플랑크톤의 인과관계를 모델에 이용하여 조사하는 연구가 다수 발표된 바 있다(Nakata, 1993). 이러한 모델 예측 결과의 검증에는 이른바 현지 검정 자료가 필요하다. 선박으로 현장의 데이터를 수집하는 것은 좋은 방법 이긴 하나, 수집되는 자료의 지리적 편차나 시간 지체에 따른 오차 등이 지적되고 있다. 한편, 식물플랑크톤의 분포패턴은 위성원격탐사기술을 이용함으로써 이러한 문제점을 부분적으로 해결하고 있다. 위성자료를 이용하여 모델예측 결과를 검증하는 연구는 그동안 많은 연구자들에 의하여 수행된 바 있다(Gordon 등, 1983; Ishizaka, 1990; Srokosz, 2000). 최근 많은 연구자들의 의해 동경만의 생물학적 과정과 그 이해를 둘러싸고 구체적인 논의가 진행되고 있다(Nakata, 1993; Horiguchi와 Nakata, 1995). 그러나, 생물학적 변수의 급속한 변화에 의한 시·공간적인 현장관측의 어려움으로 정량적인 논의가 순조롭게 진행되지 못하고 있는 측면도 있다.

이 연구에서는, 현장에서 선박관측으로 수집된 여러 해양학적 파라미터를 이용하여 동경만에 대한 생태계 모델에 적용하여 결과를 도출하였다. 그 결과를 기존의 관측 자료와 비교하여, 그 상관성에 대하여 조사할 뿐만 아니라 위성자료에서 얻어지는 식물플랑크톤 분포와 비교 분석하여 검증하고자 한다.

연구 방법

1. 생태계 모델의 개요

생태계모델의 시·공간적인 물질수송 및 확산과정을 정확하게 계산하기 위해서는 생태학적 과정과 함께 유체의 유동과정이 동시에 해결될 수 있는 방정식이 필요하다.

동경만의 물리·생태학적 메커니즘을 조사하기 위해 경압, 3차원 다층유체역학-생태계모델을 이용하였다(Nakata, 1993). 이 모델에는 외력으로 조석력, 해면의 바람응력, 담수유입으로 인한 국지적인 밀도 경도력이 고려되고 있고, 실제 관측된 연안선과 수심 등을 경계치로 이용할 수 있게 되어 있다. 카테시안 직교좌표계(Cartesian coordinate system)의 부시네스크 근사(Boussinesq approximation) 하에 진단변수, 즉 평균유속성분, 수면변위, 수온과 염분 등의 공간분포를 모델링하기 위하여, 운동방정식(식 (1) 및 (2)), 연속방정식(식 (3)), 수면변위 방정식(식 (4)), 열·염분 보존방정식(식 (5)) 등을 이용하였다. 또한 상태방정식은 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(u^2) - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) \\ & + f_0 v - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial x} dz \\ & + \frac{1}{\rho} \frac{\partial Pa}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(uv) - \frac{\partial}{\partial y}(v^2) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) \\ & - f_0 u - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{\rho} \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \\ & - \frac{1}{\rho} \frac{\partial Pa}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(N_x \frac{\partial v}{\partial x}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y}(N_y \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(N_z \frac{\partial v}{\partial z}) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-H}^{\zeta} u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-H}^{\zeta} v dz \right) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial z}(uB) - \frac{\partial}{\partial y}(vB) \\ & - \frac{\partial}{\partial z}(wB) + \frac{\partial}{\partial z}(k_x \frac{\partial B}{\partial x}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial B}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial B}{\partial z}) \quad (5) \end{aligned}$$

$$\rho = \rho(CI, T) \quad (6)$$

여기서, u 와 v 는 x, y 방향의 수평유속성분을, w 는 연직유속성분이다. ζ 는 해수면 변위, ρ 는 밀도, f 는 코리올리 파라미터, g 는 중력가속도이고, T 와 CI 은 각각 온도와 염분을 나타낸다. $N_x, N_y, N_z, k_x, k_y, k_z$ 는 x, y, z 성분의 와류점성계수와 와류확산계수를 의미한다.

생물학적 스칼라변수(B)의 이류와 확산은

식 (7)과 같은 물리 방정식으로 나타낼 수 있다. 식 (7)의 마지막 항은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있고, 이 식에 의해 식물플랑크톤의 농도를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial t} = & -u \frac{\partial B}{\partial x} - v \frac{\partial B}{\partial y} - w \frac{\partial B}{\partial z} \\ & + K_h \left(\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right) + \\ & K_z \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} + \left(\frac{dB}{dt} \right)^* \quad (7) \end{aligned}$$

$$\frac{dB^*}{dt} = B_1 - B_2 - B_3 - B_4 - B_5 - B_6 \quad (8)$$

B 는 생물학적 요소이고, 8가지 요소들 사이의 상호작용은 탄소의 흐름(mgC/m^3)에 바탕을 두고 모델화 하였다(표 1).

B_1 는 광합성일사에 의한 성장량, B_2 는 extra-cellular release loss, B_3 는 호흡에 의한 손실, B_4 는 동물플랑크톤에 의한 섭식, B_5 는 식물플랑크톤의 사망률 그리고 B_6 는 식물플랑크톤의 침강을 의미한다(그림 1).

이상의 생태계모델은 계산시간의 절약과 현실적인 관측가능성을 고려하여 최대한 간략화되어 있으나 일반적으로 연구 대상 현장에서의 생물학적 변수의 경험 방정식은 부족한 실정이다. 이 연구에서는 동경만의 생물학적 변수의 경험방정식은 Nakata(1993)의 연구에서 제시된 결과를 적용하였다.

Table 1. Each compartments of biological model

Division	Parameter	Unit
Organic elements	(1) Phytoplankton	P (mgC/m^3)
	(2) Zooplankton	Z (mgC/m^3)
	(3) Particulate organic carbon	POC (mgC/m^3)
	(4) Dissolved organic carbon	DOC (mgC/m^3)
Inorganic elements	(5) Dissolved inorganic carbon	DIP ($\text{mg-at}/\ell$)
	(6) Dissolved inorganic nitrogen	DIN ($\text{mg-at}/\ell$)
Water quality	(7) Dissolved oxygen	DO (mg/ℓ)
	(8) Chemical oxygen demand	COD (mg/ℓ)

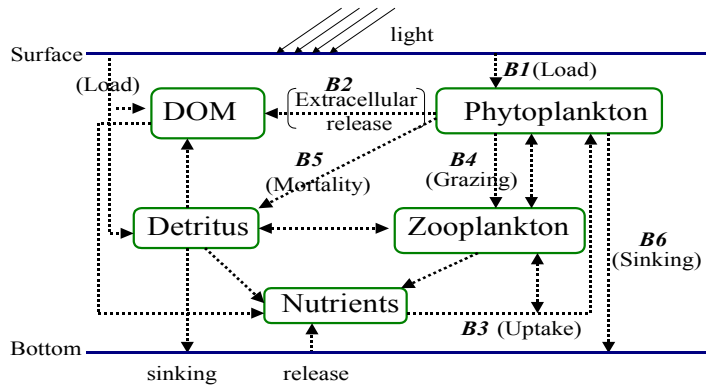


FIGURE 1. Schematic representation of the nutrient cycle model(Nakata, 1993)

2. 모델환경과 사용데이터

모델영역(35.10°~35.42°N, 139.36°~140.6°E)은 그림 2와 같고, 수평 1km, 수직 3m 간격의 10층 모델로 계산하였다. 동경만의 평균수심은 약 16m이고, 최대 100m를 넘는 깊은 곳은 30m로 가정하여 적용하였다. 모델계산은 30초 간격으로 3개월간 계산되었다. 모델의 초기치와 경계치 값은 일본 어업연구센터(CPFRC)에서 제공하였고, 월 1회 또는 2회의 평균치를 이용하였다. 관측점의 위치는 그림 3과 같다. 경계선에서의 조석자료는 일본해양테

이터센터(JODC)가 1시간 간격으로 관측한 것을 바탕으로, 조화분석(harmonic analysis)에 의해 4분조까지 계산하였다. 동경만주위의 4개의 대표적인 하천에서 흘러 들어오는 수량과 생물변수는 일본국토교통부의 통계자료를 이용하였다. 모델에 이용되는 기상조건은 동경만주위의 4곳의 자동기상관측자료(AMeDAS)를 평균하여 사용하였다.

생물변수중에서 식물플랑크톤은 주로 수온과 태양복사량 그리고 유체의 흐름에 크게 의존한다. 그 중에서도 특히 수온은 식 (9)에서

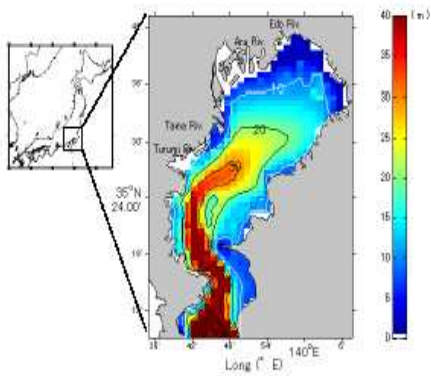


FIGURE 2. Map of the study area and the distribution of bottom topography

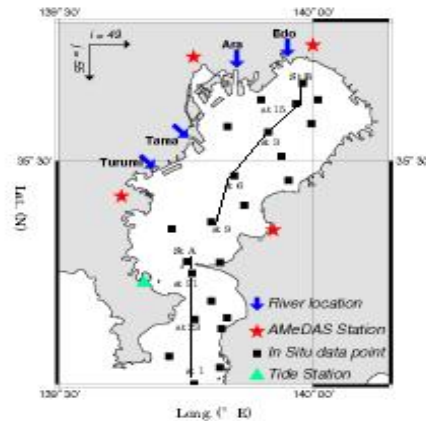


FIGURE 3. Map shows spatial distribution of in-situ observation made by Chiba Prefectural Fisheries Research Center

알 수 있는 바와 같이 생화학적 과정을 지배하는 가장 중요한 인자이다.

$$\text{Biochemical process} = a \cdot \exp(\beta_i \cdot T) \quad (9)$$

여기서, T 는 수온, a 는 수온 0°C일 때의 생물플럭스, β 는 동·식물플랑크톤의 성장이나 POC/DOC의 광물화작용에서의 온도계수이다. 표 2는 이 연구에서 사용되는 생물학적 파라미터를 정리한 것이다.

Table 2. Values of parameters used in the present model

Parameter	Unit	Value
Phytoplankton		
Maximum growth rate	day ⁻¹	0.83exp(0.0633T)
Respiration rate	day ⁻¹	0.01exp(0.0524T)
C/Chl-a rate		48.53
Zooplankton		
Maximum ration	day ⁻¹	0.18exp(0.0693T)
Mortality	day ⁻¹	0.054exp(0.0693T)
Detrital carbon		
Mineralization rate	day ⁻¹	0.2exp(0.07T)
Dissolved organic carbon		
Mineralization rate	day ⁻¹	0.02exp(0.0693T)

3. 위성자료 처리

이 연구에서는 모델로부터 계산되어진 SST (sea surface temperature) 분포의 검정을 위하여 1.1km 해상도의 NOAA/AVHRR 자료를 이용하였다. 그림 5는 2001년 3월의 월평균 이미지로 최대값 선형평균법으로 얻어진 MCSST (multi-channel sea surface temperature) (Takeuchi와 Tanba, 1998)이다.

모델을 통하여 얻은 식물플랑크톤의 농도분포를 비교검증하기 위하여, SeaStar/SeaWiFS의 자료를 처리하여 클로로필-a 농도를 추출하였다. 위성자료는 SeaDAS Ver.4 OC2 알고리즘(Tassan, 1994)으로 전처리하여, Level

1A(디지털넘버)로부터 Level 3의 월평균 데이터를 얻었다.

Gordon(1983)은 해양에서의 광합성은 해표면의 유광층(euphotic zone)에서 이루어진다고 하였다. 유광층은 바다로 입사한 태양광의 약 1%가 남게 되는 수심을 말하며, 해양은 크게 Case 1 water와 Case 2 water로 구분하여 설명되어진다. Case 1 water는 식물플랑크톤에 의한 반사가 해색을 결정하는 주원인이 되는 경우인데 반하여, Case 2 water는 식물플랑크톤 이외에 부유물질이나 영양염류, 해저면 등에 의한 반사도 큰 영향을 받게 되는 해역으로서, 수심이 얕은 연안해역이 그 대표적인 장소라고 할 수 있다. 동경만은 3월에 태양광의 투과율이 매우 낮으며, 클로로필-a 농도가 10 $\mu\text{g}/\ell$ 를 넘는 전형적인 Case 2 water의 연안해역으로 해색 센서 자료가 나타내는 수심은 5m 이하의 얕은 곳의 정보로 추측된다.

결과 및 고찰

1. 물리학적 파라미터의 분포

이 연구에서 운용된 수치모델은 초기치의 영향을 고려할 때, 계산시간이 10일이 지나면서 결과 변수가 안정치를 유지하기 시작하였다. 수치시뮬레이션을 통해 재현된 동경만의 흐름이나 조석현상은 이전의 여러 연구결과들(Unoki 와 kishino, 1977; Horiguchi와 Nakata, 1993)과 대체로 일치함을 확인할 수 있었다. 그림 4는 상층(3m)과 하층(9m)의 평균수온과 조석 잔차류의 흐름 양상을 나타내고 있다. 그림 4의 왼쪽에서 보면, 동경만의 안쪽에서는 시계방향의 소용돌이를 가진 남향류가 있고, 남쪽의 만구를 통하여 2.5cm/sec 정도의 유속으로 빠져나간다. 그러나 하층의 흐름 패턴을 보여 주는 그림 4의 오른쪽에서 보면, 표층과는 달리 약하기는 하지만 만입구를 통하여 북쪽으로 흘러드는 흐름을 확인할 수 있다. 그림으로 나타내지는 않았지만 만의 북서쪽 하천으

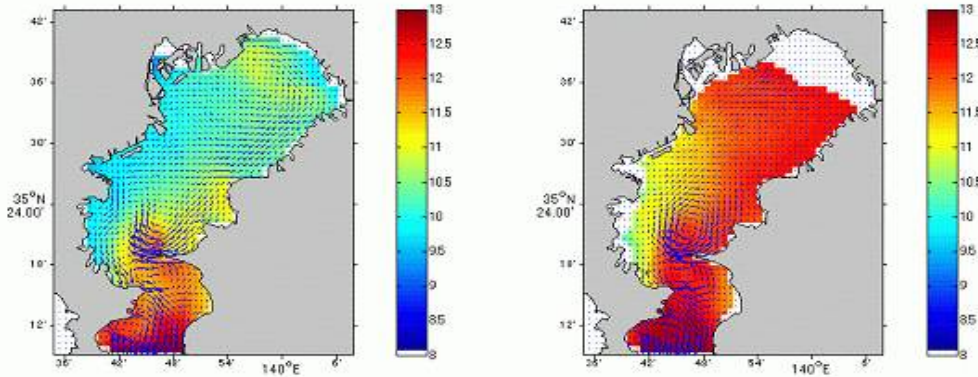


FIGURE 4. Distribution of residual flow pattern and water temperature from model results
 <Left: upper layer(0-3m), Right: lower layer(6-9m) from the model results>

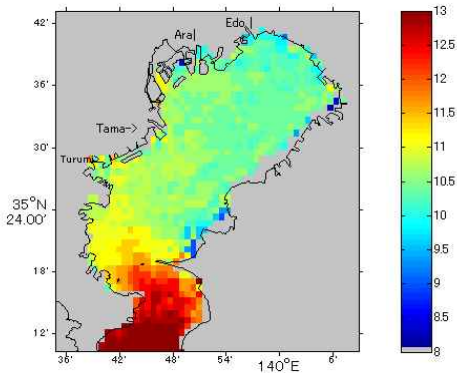


FIGURE 5. Distribution of SST/NOAA in the Tokyo Bay during March 2001

로부터 유입되는 담수는 상층을 통하여 빠른 속도로 유출되고, 이에 수반되어 하층에서는 해수의 유입이 있었다. 이러한 상하층의 반대 방향의 흐름으로 인하여 상층의 염분농도는 더욱 낮아지고 상대적으로 하층의 염분농도는 높게 나타나는 것으로 사료된다. 이러한 사실은 만내의 염분 분포도를 재현한 모델 결과가 나타내고 있으며, 이전의 Unoki와 Kishino (1977)의 관측 결과나 모델 결과(Nakata, 1993)와도 일치하였다. 그림 4에는 상층과 하층의 해수온도 분포를 수치시물레이션한 결과도 합

계 나타나 있다. 전체적으로, 상층에서는 만의 안쪽이 수온이 낮고 만입구쪽으로 갈수록 높다. 하층에서는 만의 서쪽 부분을 제외하고는 대부분의 영역에서 수온이 높다. 상층의 이러한 수온분포는 만의 북서쪽으로 유입되는 담수의 영향과 만입구 부근을 지나는 쿠로시오 난류의 영향으로 사료된다. 그리고 하층의 수온이 상층보다 높은 것은 하층을 통하여 쿠로시오로부터 해수가 직접 동경만으로 흘러들기 때문으로 판단된다. 이러한 수온분포는 그림 4에서 살펴본 만내의 흐름 패턴과도 일치하는 사실이다. 그리고 그림 4의 왼쪽에 나타낸 상층의 수온분포를 그림 5에 있는 NOAA/AVHRR의 SST와 비교해 보면, 만의 입구에서는 모델의 결과가 NOAA의 SST 보다 2.5℃ 정도 높고, 만 안쪽에서는 0.5℃ 정도 낮게 나타났다. 이러한 차이는 위성에서 얻어진 SST가 해표면(10cm) 온도를 나타내는 것에 비해, 모델은 3m까지의 평균온도를 예측한 것이기 때문으로 사료된다. 그러나 이러한 차이에도 불구하고 전체적인 패턴은 NOAA/SST와 모델의 수온 예측결과가 대체로 일치하고 있어서, 모델의 재현성을 상당히 신뢰할 수 있음을 알 수 있었다.

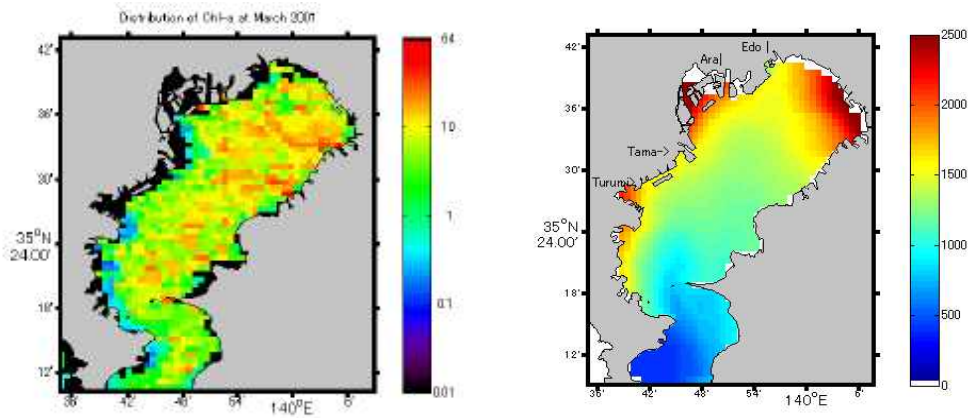


FIGURE 6. Horizontal distribution of chlorophyll-a and phytoplankton.
 <Left: SeaWiFS Chlorophyll-a(mg/m³) Right: Phytoplankton of Model output(mgC/m³)>

2. 생물학적 파라미터의 분포

그림 6(오른쪽)은 생태계모델에 의한 동경만 내의 식물플랑크톤(mgC/m³)분포 결과이다. 만의 북동쪽에서 고농도, 만입구쪽에서 저농도 분포를 보여주고 있다. 만내에서의 이러한 고농도는 하천을 통하여 육상으로부터 풍부한 영양염류 유입이 원인이고, 만입구쪽의 저농도는 쿠로시오로부터 흘러드는 영양염류가 적은 외해수의 영향으로 여겨진다. 그림 6의 왼쪽 그림은 2001년 3월에 SeaWiFS로 관측된 클로로필-a(mg/m³)의 표층 분포도이다. 전체적으로 내만쪽으로 갈수록 농도가 높고 만입구쪽으로 갈수록 농도가 낮은 분포를 보이는 것은 오른쪽의 모델예측 결과와 어느 정도 일치하는 것으로 판단된다. 그러나, 위성에서 얻어진 식물플랑크톤의 농도가 모델 예측치와 정량적으로 잘 일치하고 있다고 보기는 어렵다. 이러한 원인에는 여러 가지가 있겠지만, 위성에서 관측된 해색정보에는 클로로필-a 이외의 성분에 의한 영향도 많이 포함되어 있다는 점, 모델과 위성자료의 평균기간이 다르다는 점, 위성자료에서 클로로필-a 농도를 추정하는 알고리즘의 부정확성, 모델 초기치의 부정확성 등에 원인이 있을 것으로 판단된다. 이러한 모델과 위성

의 결과치를 정확하게 절대평가하기 위하여 선박을 이용한 풍부한 현장관측자료가 있어야 할 것으로 판단된다.

그림 5의 수온분포와 그림 6의 식물플랑크톤 농도 분포로부터 두 변량 사이에는 음의 관계가 있음을 쉽게 알 수 있다. 즉, 수온이 낮은 곳에서 식물플랑크톤의 농도가 수온뿐만 아니라 영양염류 농도에도 크게 지배되기 때문에 절대적인 상관관계가 있다고는 볼 수 없다. 그러나 3월의 경우에는, 두 변량 사이에는 73%의 높은 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

결론

이 연구에서는 현장관측의 어려움을 극복하기 위하여 개발되어 많은 발전을 거듭하고 있는 해양생태계 모델의 예측결과를 검증함에 있어서 위성자료의 유효성을 평가하고자 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 동경만 내의 흐름패턴이 모델을 통하여 비교적 잘 재현되었음을 확인할 수 있었다. 상층에서는 남쪽의 만구를 통하여 2.5cm/sec 정도의 유속으로 빠져나가는 흐름이 있고, 하층에서는 반대로 약하기는 하지만 만구를

- 통하여 북쪽으로 흘러드는 흐름이 있었다.
2. 이러한 흐름패턴과 만의 북서쪽에서 흘러드는 담수의 유입으로 표층의 염분농도는 낮고, 저층에서는 외해수의 유입으로 염분농도가 높게 나타났다.
 3. 표층의 수온은 저층보다 낮고, 저층은 남쪽의 쿠로시오로부터 유입되는 외해수의 영향으로 수온이 전체적으로 높게 나타났다.
 4. 모델에서 예측된 상층의 수온을 NOAA위성에서 얻어진 SST와 단순 비교하면, 전체적인 분포양상은 아주 유사하고, 정량적으로 만입구에서는 2.5°C 정도 높게, 내만에서는 0.5°C 정도 낮게 나타났다.
 5. 모델과 위성에서 얻어진 식물플랑크톤과 클로로필-a의 분포 양상은 만 안쪽으로 갈수록 농도가 높고, 외해수의 영향을 크게 받는 만구 쪽으로 갈수록 농도가 낮았다. 두 결과 사이에 정성적인 유사성은 확인되었으나, 정량적인 측면에서는 상당한 차이가 있음을 알 수 있었다. 역학-생태계모델을 이용하여 특정 해역의 물리-생물학적 파라미터의 분포양상을 수치모의하고, 그 결과를 검증하는데 위성에서 얻어지는 자료는 대단히 유효한 수단임에 틀림없다. 그러나, 두 가지 결과 모두에 상당한 불확실성이 내포되어 있기 때문에 지속적인 연구를 통하여 예측의 정확도를 높여야 할 것으로 사료된다. 그러한 노력의 일환으로, 모델 예측결과, 위성관측 자료, 현장관측자료 등을 상호동화하는 기술 개발이 중요한 것으로 판단되며, 지속적인 연구를 통하여 그 결과를 논할 예정이다. [KAGIS](#)

참고문헌

- 정중철, 유신재, 김정욱. 1999. 시화호와 연안해역의 부유사 분포 분석을 위한 원격 탐사 알고리즘. 한국지리정보학회지 2(2):59-68.
- 정중철. 2001. SeaWiFS 자료를 이용한 황해와 동해의 생물광학 특성 비교. 한국지리정보학회지 4(2):38-45.
- Gordon, H.R., D.K. Clark, J.W. Brown, O.B. Brown, R.H. Evans and W.W. Broenkow. 1983. Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: Comparison of ship determinations and CZCS estimates. Applied Optics 22:20-36.
- Horiguchi, F. and K. Nakata. 1995. Water quality analysis of Tokyo Bay using mathematical model. Journal of Advanced Marine Technology Conference 1(1):71-92.
- Ishizaka, J. 1990. Coupling of coastal zone color scanner data to a physical-biological model of the southeastern U.S. continental shelf ecosystem: 3. Nutrient and phytoplankton fluxes and CZCS data assimilation. Journal of Geophysical Research 95(C11):20201-20212.
- Nakata, K. 1993. Ecosystem model: its formulation and estimation method for unknown rate parameters. Journal of Advanced Marine Technology Conference 1(8):99-138.
- Srokosz, M.A. 2000. Biological oceanography by remote sensing. Encyclopedia of Analytical Chemistry:8506-8533.
- Takeuchi, W. and S. Tanba. 1998. PaNDA Ver.1.0c. Algorithm Reference 2:7-12.
- Tassan, S. 1994. Local algorithm using SeaWiFS data for retrieval of phytoplankton pigment, suspended sediments and yellow substances in coastal waters. Applied Optics 12:2369-2378.
- Unoki, S. and M. Kishino. 1977. Averaged oceanographic conditions and water exchange in Tokyo Bay. Technical Report of the Physical Oceanography Laboratory. 89pp. [KAGIS](#)