한국해양환경 · 에너지학회지
Journal of the Korean Society
for Marine Environment and Energy
Vol. 18, No. 3. pp. 233-244, August 2015

http://dx.doi.org/10.7846/JKOSMEE.2015.18.3.233
ISSN 2288-0089(Print) / ISSN 2288-081X(Online)

Technical Report

생태계기반 연안관리를 위한 생태모델 개발방향에 대한 기술적 검토 - 새만금 외해역 및 금강 하구역 사례

김해철[1] · 김용훈[2] · 장원근[3] · 류종성[4,†]
[1]미국 NOAA
[2]미국 RPS ASA
[3]한국해양수산개발원
[4]안양대학교 해양바이오시스템공학과

Technical Reviews on Ecosystem Modeling Approach and its Applicability in Ecosystem-Based Coastal Management in Saemangeum Offshore and Geum River Estuary

Hae-Cheol Kim[1], Yong Hoon Kim[2], Won-Keun Chang[3] and Jongseong Ryu[4,†]

[1]I.M. Systems Group at Environmental Modelling Center, NCEP/NWS/NOAA, 5803 University Research Court, College Park, MD 20740, U.S.A.
[2]RPS ASA, 55 Village Square Drive, South Kingstown, RI 02879, U.S.A.
[3]Korea Maritime Institute, Busan 606-080, Korea
[4]Department of Marine Biotechnology, Anyang University, Ganghwa, Incheon 417-833, Korea

요 약

생태계기반 관리를 위해서는 정책적 활용도가 높은 생태모델이 개발되어야 한다. 이러한 생태모델이 개발되기 위해서는 복잡한 생태적 과정에 대한 면밀한 이해가 우선되어야 하며, 생태학자, 모델개발자, 이해당사자 그리고 관리자 사이의 원활한 의사소통이 필수적이다. 본 논문에서는 해양생태모델의 이론적 배경, 미국과 유럽의 생태모델의 최근 기술동향, 그리고 새만금 및 금강 하구역을 대상으로 우리나라 환경현안을 다루기 위한 생태모델 개발방향을 제시하였다. 기술동향에서 소개된 내용은 역학모델 중심의 생태순환모델과 통계모델이며 이들의 정책 활용 잠재성을 토의하였다.

Abstract – Marine ecosystem modelling has become a more widely used decision-making tool in coastal ecosystem-based management. However, it is not trivial to develop a well calibrated/validated model with potential applicability and practicality because understanding ecological processes with complexities is a pre-requisite for developing robust ecosystem models and this accompanies a great deal of well coordinated efforts among field-going ecologists, laboratory scientists, modelers, stake-holders and managers. This report aims to provide a brief introduction on two different approaches in marine ecological models: deterministic (mechanistic) and stochastic (statistical) approach. We also included definitions, historical overview of past researches, case studies, and contextual suggestions for coastal management in Korea. A long list of references this report included in this study might be used as an introductory material for those who wish to enter ecosystem modelling field.

Keywords: Ecological model(생태모델), Deterministic(결정론적), Stochastic(statistical)(통계적), Ecosystem based management(생태계기반 관리)

1. 서 론

생태계기반 관리(ecosystem-based management)란 인간과 자연을 모두 포함하는 전체 생태계를 건강하고 생산성이 높으며 회복 가능한 상태로 유지하여 생태계서비스(ecosystem services)를 지속가능하게 이용할 수 있는 수준으로 관리하는 것을 말한다(McLeod *et al*. [2005]; McLeod and Leslie [2009]). 생태계기반 관리를 실제적으로 적용함에 있어,생태계에 대한 이해는 이상적인 수준으로 높은 반면에 유한한 자원에 대한 이해는 매우 현실적인 수준에서 이루

†Corresponding author: jsryu@anyang.ac.kr

어지기에 이 둘이 상충하는 문제가 종종 발생하게 된다. 더불어 이해관계의 갈등이 일어나는 가장 근본적인 이유 중 하나는 이해관계자(stakeholders) 사이의 의사소통이 원활하지 못하여(예, 전문가 그룹과 정책관리자) 의사결정 과정에서 과학정보가 효과적으로 이용되지 못하거나, 정책 활용도가 높은 과학지식이 생산되지 않기 때문이다(Conway and Opsommer [2007]; Davos *et al*. [2002]; Roux *et al*. [2006]; Ryu *et al*. [2011a]). 의사 소통을 원활하게 만들기 위해서는 정책관리자 및 이해관계자 그룹과 같은 비과학자들을 위한 생태계 전문지식의 전달이 매우 중요하다 할 수 있다(Rowe and Frewer [2000]). 이러한 노력의 일환으로 본 논문에서는 생태계기반 관리의 필수도구로 대두되고 있는 생태모델을 소개하고자 한다.

생태모델(ecological model)은 생태계를 구성하는 생물학적 요인과 무생물학적 요인 간의 관계 및 이들의 시공간 분포 변화를 수치적으로 표현한 것이다(Kim and Cho [2013]). 생태계의 다양한 생물적, 무생물적 요인들을 상태변수로 간주하고 이들 간의 상호관계를 미분방정식 등을 이용한 시간의 함수로 표현한 후 이를 수치적으로 풀어 내면 상태변수의 시간 및 공간적 변화를 추정하고 예측할 수 있게 되는데, 이러한 일련의 행위 전반이 생태 모델링에 포함될 수 있다. 일반적으로 모델의 정확성은 이러한 상태변수들의 관계를 얼마나 정확하게 나타내는가에 달려있으며, 생태모델의 신뢰성을 높여 실생활에 응용되도록 하려면 생태계 구조의 근간인 생물과 무생물 요인들의 생태적과정(ecological process)을 보다 정확하고 자세하게 이해하는 것이 선행되어야 한다.

일반적으로 생태적과정은 생태계 내의 물질순환, 에너지 흐름과 같은 생물과 무생물 간의 관계를 포함할 뿐만 아니라 진화, 경쟁, 먹이사슬, 천이와 같은 개체, 개체군, 군집 수준에서의 생물학적 상호작용이 내재되어 있기 때문에 매우 복잡하다(Levin [1998]). 이러한 복잡한 생태적과정에서 비교적 상세하게 밝혀진 부분을 추출하여 미분방정식의 형태로 기술하는 것이 생태역학모델이며, 복잡한 생태적 과정을 원리로 설명하기는 어렵지만 축적된 경험을 통해 통계적으로 나타낼 수 있는 경우를 수치화한 것이 생태통계모델이다.

국내에서 해양관리에 주로 활용되고 있는 모델은 해수유동, 퇴적역학, 간단한 수질 모델 정도이며, 생태모델은 역학모델의 관점에서 빈번하게 연구되고 있음에도 불구하고 해양관리에 활용된 사례는 아직 그리 많지 않다. 그 이유는 규명하고자하는 생태적과정이 종종 매우 복잡하여 간단한 수식으로 모델화 시킬 수 있을 정도로 이해되고 있지 못하기 때문이다. 복잡한 생태적과정을 이해하기 위해서는 생태학자가 장기간에 걸쳐 표준화된 방법으로 집중적인 관찰과 실험을 수행해야 한다. 또한 모델화가 가능한 생태적 과정의 종류와 규모를 선정하기 위해서는 생태학자와 모델개발자 간에 긴밀한 의사교환이 필요한데, 아직 우리나라는 이러한 연구 풍토가 안정적으로 정착되지 않았다. 반면, 미국이나 유럽에서는 이미 장기간에 걸쳐 연구된 생태적 지식을 바탕으로 적조, 비브리오균 및 해파리의 발생을 예측할 수 있는 생태모델을 연안관리에 적용하고 있는 수준에 이르고 있다. 그 예로 미국에서는 해양대기청(NOAA)을 중심으로 실시간 생태예보(ecological forecasting)를 준비 중이며(http://oceanservice.noaa.gov/ecoforecasting/), 유럽에서는 오래전부터 인간활동 및 기후변화에 의한 해양 생태계의 반응을 고려한 생태계기반 관리방안을 수립하고 이를 개선해오고 있다(Fig. 1).

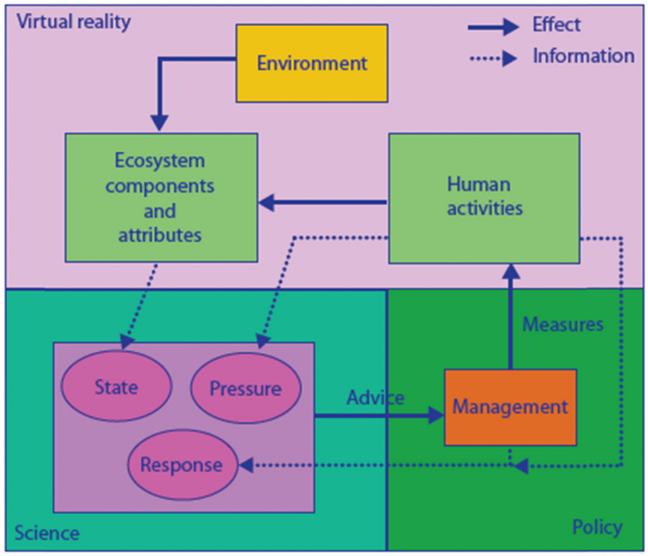

Fig. 1. Diagram showing the management strategy evaluation in ecosystem-based management (source: https://www.meece.eu).

최근 우리나라에서도 수십 년 동안의 장기간 모니터링 자료를 분석하여 생태적과정을 설명하려는 시도가 성공을 거두고 있으며(Kim *et al*.[2011]), 이러한 학문적 경험과 성과를 바탕으로 연안 환경 및 생태계 변화를 효과적으로 관리할 수 있는 시스템을 개발하려는 장기간 국책 연구사업이 진행되고 있는 중이다. 이러한 종합관리시스템의 목적은 관리해역의 생태계 상태를 올바르게 진단하고, 변화를 정확하게 예측하며, 생태계 피해를 최소화할 수 있는 관리방안을 마련하는 것이다. 따라서 관리시스템의 성공여부는 현장관측, 원격탐사 및 실험실 기술을 이용하여 장기간 자료를 축적하고 이를 분석하여 생태적과정을 설명하고, 이를 예측할 수 있는 모델을 개발할 수 있는 능력에 달려있다. 본 논문은 우리나라 연안 생태계를 관리함에 있어 생태모델의 적용가능성을 타진해 보고자 한다. 이를 위해 2장에서는 해양 생태 순환모델(역학모델)과 해양 생태 통계모델로 나누어 해양생태계 모델링을 소개하였다. 3장에서는 정책적 활용도가 높은 미국의 해파리모델, 유럽의 ERSEM을 상세하게 소개하였다. 마지막 새만금과 금강하구를 사례로 하여 생태 및 환경 현안을 간략하게 제시하고 이를 다룰 수 있는 생태모델의 정책적 활용 잠재성을 토론하였다.

2. 해양 생태 모델

2.1 해양 생태 순환모델(역학모델)

역학 모델은 미분방정식의 직접적인 풀이를 통한 상태변수의 역

학적 변동을 추정하기 때문에 구체적인 정책 결정을 위한 도구로 이용될 수 있는 응용성과 역학적인 측면이 강하다. 흔히 말하는 초기 생태 역학 모델은 Malthus [1798]가 제기한 인구의 기하급수적인 증가를 설명하는 방법론에서 시작되고, 이후 Verhulst [1838], Lotka [1925], Voltera [1926]는 생태계 구성 요소 간의 관계를 설명하고자 노력하였다. 개체군 변동의 역학에 관한 연구는 육상생태계에서 많이 수행되어왔는데, 주로 경쟁, 기생, 공생, 포식, 피식 등 생태적 과정을 수치적으로 설명하고자 하였다. 생태학계의 거두인 Eugene Odum과 Howard Odum 형제는 생태계 구성 요소들의 상관관계를 전기회로도와 유사한 회로도로 표현하여 계 내에서 복잡한 물질 및 에너지 흐름을 한 눈에 볼 수 있도록 모식화하기도 하였다(Odum [1953]).

해양생태계에서도 많은 생태 역학모델에 대한 연구가 수행되었다. 가장 대표적인 NPZ모델은 해양 생태계의 영양물질(Nutrients), 식물플랑크톤(Phytoplankton), 동물플랑크톤(Zooplankton)의 관계를 간단한 함수로서 매개변수화한 것으로 세 요소의 첫글자를 따서 NPZ모델로 명명된다. NPZ모델은 식물플랑크톤이나 박테리아 등 하위 영양단계의 생물량 변동을 연구하는데 유용한 도구로 사용되고 있다. 대표적인 NPZ 모델로서 Franks *et al*. [1986]이 제안한 형태가 많이 인용되고 있으나, 이 모델은 많은 생태 역학모델 중 하나이며 기원을 거슬러 올라가면 Riley [1946]가 제안했던 형태에서 크게 벗어나지 않는다. 초기 해양 플랑크톤 생태모델의 또 다른 대표적인 연구로서 Steele and Frost [1977] 등의 연구가 있으며, Freedman [1980]은 단일종의 성장 및 피식-포식자의 관계 그리고 Blower and Roughgarden [1987]은 해양 생태계의 숙주와 기생관계에 대한 연구를 수행한 바 있다.

1970년대 이후 컴퓨터 연산 능력 및 측정 기술의 발달로 해양 현장 자료의 수집이 용이해지고 정확도가 높아지면서 해양생태계를 체계적으로 이해할 수 있는 토대가 마련되었다. 1970년대 초반 Walsh [1972]는 해양학에 있어서 학제간 연구의 필요성을 제기한 바 있다. 해양 생태계의 종합적인 연구가 필요하다고 했던 문제제기는 디지털 혁명으로 진보된 연산능력을 가진 컴퓨터가 등장할 때까지 미완의 숙제로 남을 수 밖에 없었으나, 현재는 진보된 과학기술을 이용하여 물리-생물학적 방법을 결합한 체계적인 방법의 이용이 가능해 졌다. Walsh [1972]는 용승해역의 생태계를 연구하기 위해 물리-생물학적 방법을 결합한 체계적 접근 방법을 제안했는데, 이를 위해 그가 제시한 모식도는 생태계를 구성하는 다양한 생물적, 물리적 요소를 체계적으로 결합했으며, 이는 해양 생태 순환모델 연구에 있어서 지금도 자주 인용되는 표준 방법 중 하나이다. 여기서 언급한 해양 생태 순환모델이란 개체군 증감에 대한 초기 생태 역학모델에서 변형 발전되어 생태계 변동의 원인을 단순한 생물학적 과정의 고찰을 통해서만 찾는 것이 아니고, 해양생태계를 둘러 싸고 있는 물리적 환경의 역학적 변동, 즉 유동 및 혼합과정과 같은 유체역학적 특성을 함께 고려하여 생태계 특성을 정량화하는 진일보한 형태의 모델이다. 해양 생태 순환모델은 수치 연산과정에 비용이 많이 들지만, 생태계의 변동 양상을 종합적이고 구체적으로 설명하고 예측할 수 있는 장점이 있다. 이 때 물리작용을 중요하게 고려한 이유는 해양생태계 구성요소 간의 물질순환의 매개체 역할을 하기 때문이다. 예를 들면, 일차생산에 필요한 영양염의 전달은 해수의 확산(diffusion), 용승(upwelling), 난류 혼합(turbulence mixing)과 같은 물리적 과정을 통해 이루어지며, 해양생태계에서 순환되지 않고 남아 있는 물질이 생태계를 빠져나가는 과정 역시 침강(sinking)과 같은 물리적인 요인이다. 또한 온도가 10 ºC 증가하면 대사활동이 약 2배 증가한다는 Q_{10} 법칙에 따르면 생물학적 대사 반응을 체내 온도의 함수로 나타낼 수 있는데(Epply [1972]), 변온성 생물이 대부분인 해양 생물의 경우 생물체를 둘러 싸고 있는 매질, 즉 해수의 온도에 의해 체온이 결정된다. 수온은 해수 혼합과 같은 물리작용의 원인 및 결과가 되기 때문에 물리적 과정이 생물반응에서 중요하게 고려될 수 있는 것이다.

오늘날 해양 생태 순환모델은 Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS), Global Ocean Ecosystem Dynamics (GLOBEC), Land Ocean Interaction in the Coastal Zone (LOICZ)와 같은 International Geosphere and Biosphere Programme (IGBP) 산하 학제간 국제 공동연구를 통해 축적된 자료 및 지식을 종합화하기 위한 도구로 이용되면서 1990년대 중반부터 눈부시게 발전하였다. 현존하는 많은 해양 모델들은 해수의 유체역학을 3차원 공간에 구현한 형태이며, 많은 3차원 해양물리 모델이 해수의 움직임과 해수 내 존재하는 생지화학 및 생태계 구성요소의 공간 변동과 유기적으로 결합한 형태인 생물-물리 결합 모델로 진화하고 있다. 특히, 미국 또는 유럽에서 개발된 소스코드 개방형 해수순환모델이 위와 같은 생지화학 또는 생태

Table 1. List of ocean general circulation models (OGCMs) modified from Kim and Cho [2013]

Name	Grid	Vertical coordinate
Regional Ocean Modeling System (ROMS)	Structured	σ, s
Princeton Ocean Model (POM)	Structured	σ, s
Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM)	Structured	Hybrid (z, σ, isopycnal)
Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model	Structured	Isopycnal
MIT General Circulation Model (MITgcm)	Structured	r
GFDL Modular Ocean Model (MOM)	Structured	z
Environmental Fliud Dynamics Code (EFDC)	Structured	σ, s
Coupled Hydrodynamical Ecological model for Regional Shelf seas (COHERENS)	Structured	σ, s
Ocean PArallelise (OPA) (NEMO ocean related engine)	Structured	z, s
QUODDY	Unstructured	s
Advanced CIRCulation model (ADCIRC)	Unstructured	s for 3-D version
Finite Volume Coastal Ocean Model (FVCOM)	Unstructured	σ, s

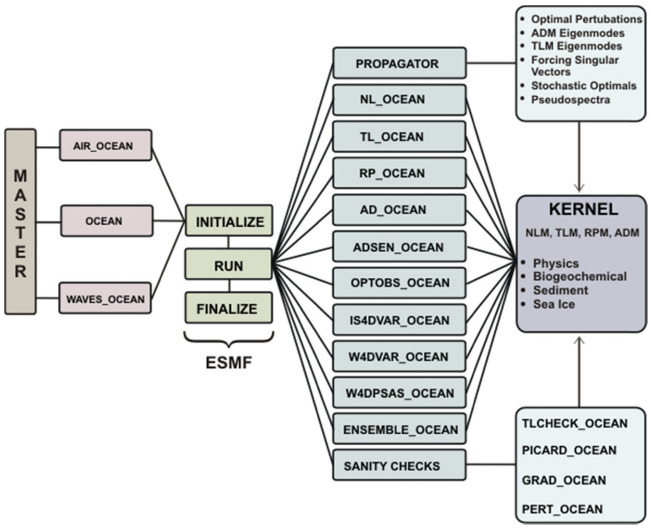

Fig. 2. Framework diagram of the Regional Ocean Modling System (ROMS) (source: https://www.myroms.org/).

모듈(sub-module)을 개발(development) 또는 구현(implementation)하고 있는 중이며, 다양한 해역의 사례 연구에 이용되고 있다(Table 1). 이들 3차원 해양 생태 순환모델들이 가지는 공통점은 해양생태계 내에서 벌어지는 생태적과정은 대부분 추적이 힘든 비보존적인 형태이지만, 해류 흐름에 따른 생태계 구성요소의 공간적인 분포는 온도와 염분과 같은 보존적 추적자(tracer)를 이용하여 역학 모델 내부(on-line) 또는 외부(off-line)에서 다른 물리적 요소들과 함께 계산된다는 점이다.

3차원 해양 생태 순환모델의 이해를 돕기 위해 소스공개 및 사용자의 자발적 기여로 모델 개발 및 구현에 성공한 사례인 해양물리모델 Regional Ocean Modeling System (ROMS)와 그에 따른 생태 부모듈에 대해 자세히 설명하고자 한다(Fig. 2). 미국 Rutgers 대와 UCLA의 공동 연구로 개발된 ROMS는 회전, 성층화, 수직혼합과 같은3차원 유체유동을 원시방정식(primitive equation) 형태의 지배방정식으로 표현하고 이 유체역학 방정식의 해를 수치적으로 계산하여 유속, 수온, 염분 등과 같은 물리적인 상태변수들의 시공간 변화를 한 눈에 볼 수 있도록 하였다. 흔히 해양 순환모델을 나누는 특성 중 하나인 수직 좌표 구조의 경우 시그마(σ)라 불리는 비율에 근거한 배분을 사용하였고(Table 1), 대기와 해양의 경계면 높낮이가 변할 수 있도록 자유표면(free surface) 방식을 채택했으며, 퇴적물과 수층의 경계면에 근접할수록 경계층의 변화를 자세히 보기 위해 조밀한 간격으로 수층의 수직구조를 설계하였다. 아울러 모델 영역(domain)의 수평 격자 구조는 일정한 사각형 격자의 조합을 사용하였다(structured curvilinear grid). ROMS는 코드가 공개된 개방형 모델이기 때문에 전 세계의 많은 연구자들이 ROMS 개발 및 구현에 자발적으로 참여하고 있어 응용연구가 가장 많은 모델 중의 하나이다(Haidvogel *et al*. [2000]; Marchesiello *et al*. [2003]; Peliz *et al.* [2003]; Di Lorenzo [2003]; Dinniman *et al.* [2003]; Budgell [2005]; Warner *et al.* [2005a,b]; Wilkin *et al.* [2005]). 특히, 대기, 파랑과 조석, 그리고 해빙 모델과 같은 해양 순환에 영향을 미치는 내적, 외적 요인들을 양방향의 진보한 형태로 접합시켰으며, 표영생태 및 저서생태 모델을 부모듈(sub-module)로 접합하여 제공함으로써 사용자의 필요에 따라 변형할 수 있도록 하였다. 특히, 해양 예보에 필수적인 자료 동화(data assimilation)에 4DVAR(Four Dimensional Variation Analysis)또는 EnKF(Ensemble Kalman Fileter)와 같은 자료 동화 기법들을 차용하여 모델 예측 결과의 불확실성을 줄이는 노력을 기울이고 있다.

ROMS에 접합되어진 생지화학 및 생태 부모듈은 EcoSim (Bissett *et al*. [1999a,b]; [2004]; [2005]), NEMURO (Kishi *et al*. [2007]), NPZD (Franks [1986]; Powell *et al*. [2006]), Fennel (Fennel *et al.* [2006]; [2008]) 등이 있다. 참고로, 여기서 소개하는 EcoSim은 수산분야에서 많이 쓰이는 Eco-path 모델과 연관된 Eco-sim 모델과는 전혀 다른 모델이다. EcoSim 모델은 생태 모델과 식물플랑크톤의 광생리적 특성을 결합시킨 모델로서 하위 생태계 구성요소 중 생물적 요인인 박테리아와 식물플랑크톤, 무생물적 요인인 무기 영양염류(예, 질산염, 암모니아, 인산염, 규산염, 철 및 용존성 무기탄소), 용존성 유기물질(예, 탄소, 인, 질소, 규소 및 철 성분), 입자성 유기물질(예, detritus, marine snow) 사이의 생태적과정을 수식으로 표현하여 ROMS에 접합시켰다. 이를 통해 위에 열거한 상태변수들의 물리-생물학적 변화를 시공간적으로 추적할 수 있도록 하였다. 특히, 식물플랑크톤을 광생리적(photophysiological) 특성에 따라 7개의 그룹(functional group)으로 나눈 후, 각 그룹이 흡수하거나 산란하는 가시광선 영역 (400-700 nm)의 파장대를 파악하여 내재적 광학특성(Inherent Optical Properties)을 계산하고, 이를 통해 소광계수와 같은 겉보기 광학특성(Apparent Optical Properties)을 도출하였다. 또한, 색소성 용존유기물(Colored Dissolved Organic Matter)의 광학적 특성을 파장대 별로 계산하여 과거보다 훨씬 복잡하고 정교한 광학알고리즘을 적용하여 수층에 존재하는 빛의 광학적 특성을 계산하였다. 정확하게 계산된 해수 중 광량 정보를 토대로 식물플랑크톤 광합성에 의한 무기탄소의 동화량을 계산할 수 있는데, 이를 이용하면 대기에서 해양으로 흡수(또는 역방향으로 방출)되는 이산화탄소의 총량을 계산할 수 있게 된다. 이와 같은 정보는 해양 산성화와 같이 기후 규모로 변하는 과정을 역학적으로 추적하는 데 도움이 된다. 이 모델은 철분비옥화(iron fertilization) 연구에 적용되어 기후변화를 저감할 수 있는 지구공학적 기술분야로 응용된 바 있다. EcoSim 모델의 상태방정식, 광학 알고리즘, 모델 매개변수화, 초기화에 관한 내용은 Bissett *et al.* [2004]에 자세하게 서술되어 있다.

2.2 생태 통계 모델

생태 역학모델이 상미분방정식 또는 편미분방정식을 수치적으로 풀어 생태계 상태변수의 시공간 변화를 추정하는 것과 달리 생태 통계모델은 다양한 통계적 기법에 기반하여 생태계 현상 중 관심대상의 시공간에 따른 변화를 경험식으로 도출하여 미래에 있을 변동을 예측한다. 따라서 결정론적 역학모델에 익숙한 연구자에게는

통계모델이 다소 생소할 수 있지만, 복잡한 생태계 구성요소의 시공간적 변화 패턴을 예측할 수 있다는 측면에서 생태 통계모델은 역학모델이 가지는 한계를 극복할 수 있는 장점이 있다. 또한 오늘날 많은 모델 연구자들이 사용하는 자료동화 기법도 경험적(empirical) 또는 확률적(stochastic) 접근법을 채택하기 때문에 통계모델로 분류될 수 있는데, 예를 들면 Ensembles, Bayesian, Monte Carlo 등의 통계적 방법이 적용되고 있다. 모델값과 관측값의 차이를 최소화하는 목적함수(cost function)를 찾기 위한 파라미터 최적화 방법으로 사용되는 공액경사법, 최소자승법, 변분수반법, 시뮬레이티드 어니얼링, 유전알고리즘도 대부분 통계 방법론에 기반을 두고 있다. 기상예보 모델에서도 역학방정식을 풀기 위해 결정론적인(deterministic) 방법에만 의존하지 않고, 통계적 방법을 함께 사용하는 하이브리드형 접근 방법(ensemble approach)을 채택하기도 한다.

생태 통계모델은 새로운 상황에서 생태계의 분포 또는 변화를 예측해야하는 경우 불확실성을 다룰 수 있는 모델이다(Constable [1999]). 생태 역학모델은 생태계 변화과정의 메커니즘에 대한 엄밀한 이해를 전제하기 때문에 복잡한 생태계 모델에 적용하기 어렵고, 또한, 미분방정식으로 표현되는 지배방정식을 풀었을 때 얻을 수 있는 상태 변수 해의 갯수가 제한적인데 반해, 생태 통계모델은 생태적과정의 메커니즘에 대한 이해가 다소 불확실하더라도 환경과 생물간의 관계에 대해 장기간 축적된 경험과 자료를 토대로 생태계 변화 추세 및 패턴을 예측할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들면 환경변화에 따른 저서동물 군집의 우점종(Warwick [1986]), 부유물식자/퇴적물식자(Pearson and Rosenberg [1978]), 퇴적물 입도에 의한 대상분포(Thorson [1950]; Rhoads and Young [1970])와 같은 생태계 구성요소의 변화는 오래전부터 잘 알려져 있으나 이를 예측할 수 있는 결정론적 역학모델은 개발이 어렵다. 왜냐하면 생태계를 구성하는 수많은 환경요인과 생물요인들 간의 상호작용 및 환경요인 간의 인과 과정은 매우 복잡하며, 그 결과물인 생물의 분포를 결정하는 기작을 환원론적으로 단순화시켜 이해하는 것은 무리한 접근 방법이기 때문이다. 이러한 경우 생물의 분포를 결정하는 환경요인을 다변량통계 기법을 이용하여 추출한 후 새로운 지역에서 환경요인을 이용해 생물분포를 예측하는 통계모델이 효과적이며 최근에 많이 개발되고 있다(Ysebaert *et al.* [2002]; Thrush *et al.* [2003]; Ryu *et al.* [2011b]).

최근 생물분포를 예측하는 통계모델로 많이 사용되고 있는 로지스틱회귀모델(logistic regression model)의 경우, 로짓함수(logit function)을 이용하여 환경변수를 독립변수로 하고 생물분포 확률을 종속변수로 하는 함수식을 도출한다. 도출된 함수식은 로짓함수가 일차선형인 경우 S자 모양을 보이고, 이차 이상인 경우는 종(bell) 모양을 보이기 때문에 생물종의 출현확률을 예측하는데 매우 효과적이다(Fig. 3). 따라서 환경요인을 이용해 대형저서동물의 공간분포(Ysebaert *et al.* [2002]; Thrush *et al.* [2003]; Ryu *et al.* [2011b]), 해파리의 출현확률(Dekker *et al.* [2007]), 비브리오균의 출현(Constantin de Magny *et al.* [2009]; Jacobs *et al.* [2010])을 예측할 수 있는 로지스틱회귀모델이 개발되어 있다.

로지스틱 함수와 더불어 소개할 또 하나의 통계적 접근법으로 신경망기법 (Neural Network technique)이 있다. 이 방법은 매우 정교하면서도 편리한 수학모델로서 입력변수와 출력변수 간의 비선형적인 관계를 통계적인 학습 알고리즘으로 모사할 수 있는 방법이다(Fig. 4). 입력변수와 출력변수의 관계가 비선형적이거나 잘 알려져 있지 않은 경우에 두 변수를 매개하는 가장 가능성이 높은 전환함수(transfer function)를 도출하면 가장 근사하게 모사할 수 있다(Krasnopolsky [2013]). 신경망기법은 공학과 경제학 등 사용되는 분야가 매우 넓으며, 지구과학 분야에서 과거 시계열 자료를 기반으로 미래의 변동을 예측 한다거나(Elsner and Tsonis [1992]), 원격탐사 분야에서는 대기와 해양의 물리적 성질을 추출할 역산 알고리즘(inversion algorithm)을 신경망 기법으로 대체하기도 한다(Vann and Hu [2002]; Kim *et al.* [2014]). 또한 원격탐사 광학반사도 자료로부터 목적변수를 분류할 때 사용되는 자료추출 알고리즘에도 최대근사법(maximum likelihood), 퍼지그룹이론(fuzzy group theory)과 더불어 인공신경망(artificial neuron network) 기법이 이용되고 있는데(Krasnopolsky *et al.* [2000]), 이들 모두 통계적 기법에 기반한 통계모델의 일종으로 볼 수 있다. 신경망 기법은 최근

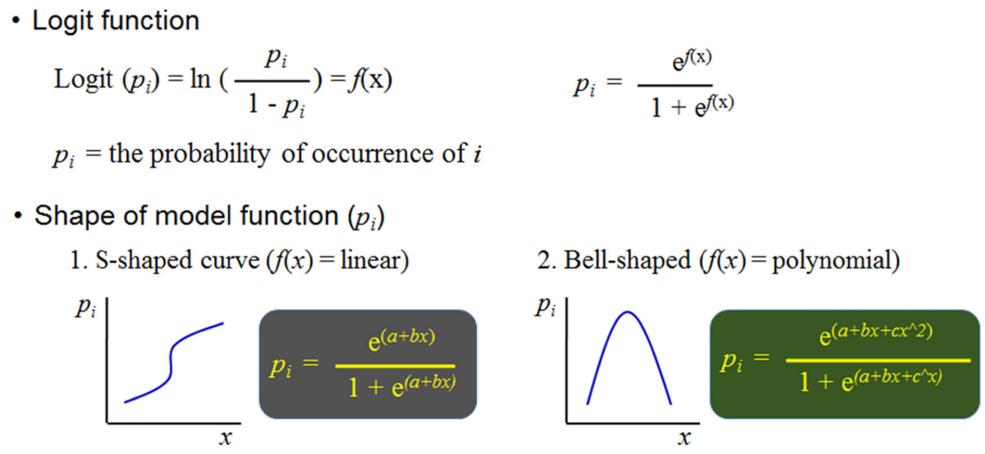

Fig. 3. Logit function and shape of the model function used in logistic regression model.

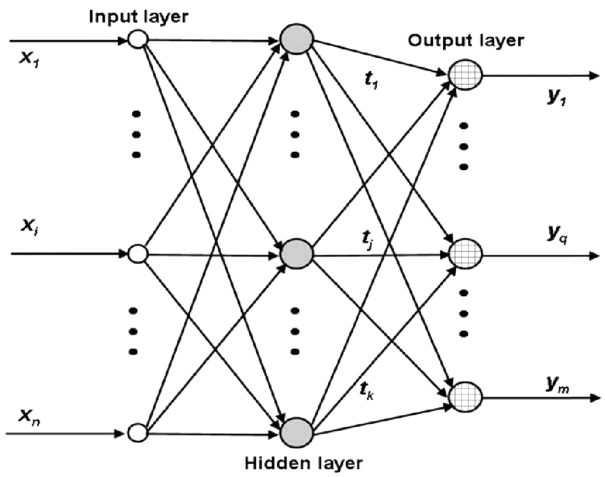

Fig. 4. A simplified example of neural network with multi layer perception (source: Krasnopolsky, 2013).

해색(ocean color) 위성자료의 반사도(reflectance)와 해양 식물플랑크톤의 생체량 사이의 관계를 추정하려는 연구에 특히 많이 이용되었다(Keiner and Brown [1999]; Gross *et al*. [2000]; Kim *et al.* [2014]). 신경망 기법은 비선형 최적화에 드는 시간과 연산 비용이 크다는 단점이 있지만, 일단 학습을 통해 얻어진 정보는 유사한 경우에 반복적으로 사용할 수 있다는 장점이 있다.

복잡한 생태계의 변화를 각 요소별로 정량적으로 예측하는 것이 불가능할 수도 있지만, 통계모델의 일종인 생태계망 모델(ecological network model)을 통해 생태계의 일반적인 행태를 기술하고 예측하는 것이 어느정도 가능하다(Boyd [2012]). 특히 생태계가 외부 교란을 받아 붕괴되기 직전에 생태계가 주는 사전 경고메시지에 대한 최근 연구들은 미래의 생태계 붕괴 가능성을 사전에 예측할 수 있는 기초를 마련하고 있다(Dai *et al.* [2012]; Scheffer *et al.* [2009]; Veraart *et al*. [2012]). 생태계 구성요소의 사전 경고메시지는 핵심종의 멸종이 될 수도 있고(Hooper *et al.* [2005]; Cury *et al.* [2011]), 생물다양성의 감소가 될 수도 있으며(Midgley [2011]), 회복속도가 느려지는 것일 수도 있는데(Carpenter *et al.* [2011]), 이 때 사전 경고메시지를 추출하기 위해 자기상관(autocorrelation)과 같은 통계적 기법을 이용하므로 생태 통계모델에 속한다(Scheffer *et al*. [2009]). 이러한 연구는 핵심종의 멸종가능성을 사전에 예측할 수 있게 하고, 생물다양성의 감소를 주의깊게 관찰하고 법적으로 보호할 수 있는 이론적 근거를 마련해 주며, 생태계의 붕괴를 사전에 감지할 수 있는 의미있는 지표를 개발하고 이를 예측하게 해준다. 따라서, 장기간에 걸친 관측을 통해 개발되는 생태 통계모델은 생태계를 기반으로하는 연안환경관리에 반드시 필요한 요소이다.

3. 기존 사례 연구 및 향후 연구 방향

3.1 생태예보를 통한 해파리, 비브리오 및 적조 출현 예측

기상 예보가 앞으로 있을 날씨의 상태 또는 변화를 기상 모델과 위성 자료를 이용해서 예측하는 것이라면, 생태 예보란 생태계와 생태계 구성 요소 그리고 인간에게 영향을 미치는 물리적, 화학적, 생물학적인 변화를 예측하는 것이다. 현재 미국 해양대기청(NOAA)에서는 생태예보를 실시간으로 할 수 있는 시스템을 준비 중인데, 사전 단계로서 학계와의 활발한 공동 연구를 통해 생태 예보에 필요한 모델 및 생태적과정에 대한 현장 연구 경험을 축적하고 있다. 대표적인 연구 사례로는 미국 동부연안 체사피크만(Chesapeake Bay)에 서식하는 해파리 *Chrysaora quinquecirrha*의 출현을 예보하는 연구가 있다. 생태학자들은(Decker *et al*. [2007]) 이 해파리 종이 수온 20 ºC 이상 염분 12-16 범위에서 번성한다는 선험적인 정보를 기반으로, ROMS와 같은 물리 모델에서 예측되는 수온 및 염분의 시공간 분포자료를 이용하여 해파리의 출현확률을 예측하는 모델을 개발하였다(ChesROMS (http://sourceforge.net/project/chesroms/). 이 모델은 수온, 염분, 부유 퇴적물 농도 등 환경변수와 해파리 서식양상을 로지스틱회귀모델을 이용하여 예측한 연구결과를 기본으로 하며, 현재 미국 해양대기청에서 현업으로 운용되고 있는 해양물리모델과 접합되어 있어 해파리 출현에 대한 실시간 생태예보가 가능하다(Fig. 5). 참고로, 미국 해양대기청에서는 Chesapeake Bay Operational Forecast System (CBOFS2)라고 불리는 ROMS 기반의 해양물리예보모델을 상시 운영 중이어서 체사피크만의 파랑, 조석, 유속, 및 수온, 염분 등 해황에 대한 정보를 항상 접할 수 있다(http://tidesandcurrents.noaa.gov/ofs/cbofs/cbofs.html).

병원성 세균 중 비브리오균 *Vibrio cholerae*, *Vibrio vulnificus)*의 출현도 해파리와 마찬가지로 수온과 염분에 매우 의존적이기 때문에 로지스틱회귀모델을 이용하여 비브리오균의 출현을 예측하는 모델이 개발되어 있다(Constantin de Magny *et al*. [2009]; Jacobs *et al*. [2010]). Brown *et al*. [unpublished] 등은 신경망 기법을 차

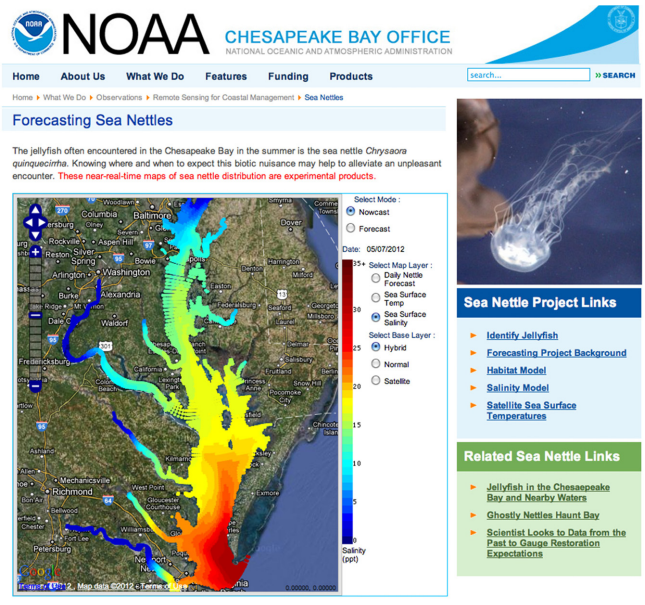

Fig. 5. Map showing the estimated distribution of sea nettles in Chesapeake Bay (source: http://chesapeakebay.noaa.gov/remote-sensing-for-coastal-management/forecasting-sea-nettles).

용한 경험적 방법론을 이용하여 적조 생물의 일종인 *Karlodinium veneficum*의 출현을 예측하기도 하였는데, 마찬가지로 이 모델에 입력되는 변수로는 수온, 염분, 시간과 같은 해양 환경 정보이다. 때문에, 물리적인 해황 정보의 정확한 예측이 필수요소라고 할 수 있겠다.

3.2 유럽지역해양 생태모델(ERSEM)

ERSEM (European Regional Seas Ecosystem Model)은 유럽연합의 지원으로 지난 20여년 동안 지속적으로 개발, 검증된 부유생물 기능타입(plankton functional type; 이하 PFT로 줄임)을 모의 및 예측할 수 있는 대표적 생태모델이다(Baretta *et al*. [1995]; Blackford *et al.* [2004]; Holt *et al.* [2005], [2009]; Edwards *et al.* [2012]; Fig. 6). 여기서 PFT란 모델에서 다루는 부유생물을 기능에 따라 분류한 것을 의미한다. 이 모델은 NPZD (Nutrient-Phytoplankton-Zooplankton-Detritus)의 한 종류로 분류될 수 있으며, 온대지역의 연안 및 대륙붕에 일어나는 생태현상을 설명할 목적으로 개발되었다. ERSEM은 부유생태계의 복잡성을 모사할 수 있고, 용존성 유기물이 박테리아 등 생물의 흡수/분해 작용을 통해, 다시 생태 먹이망 내로 포함되어지는 과정인 미소생물먹이망(microbial loop) 모듈을 탑재하고 있으며, 다양한 종류의 영양염 stoichiometry(화학반응에서 다른 원소간의 몰 비율)에 대한 연산이 가능하고, 탄소와 일차생산의 비율을 모의할 수 있도록 설계되어 있다. 생태계의 최저단계에 있는 일차 생산량, 고등 동물의 먹이가 되는 동물 플랑크톤,

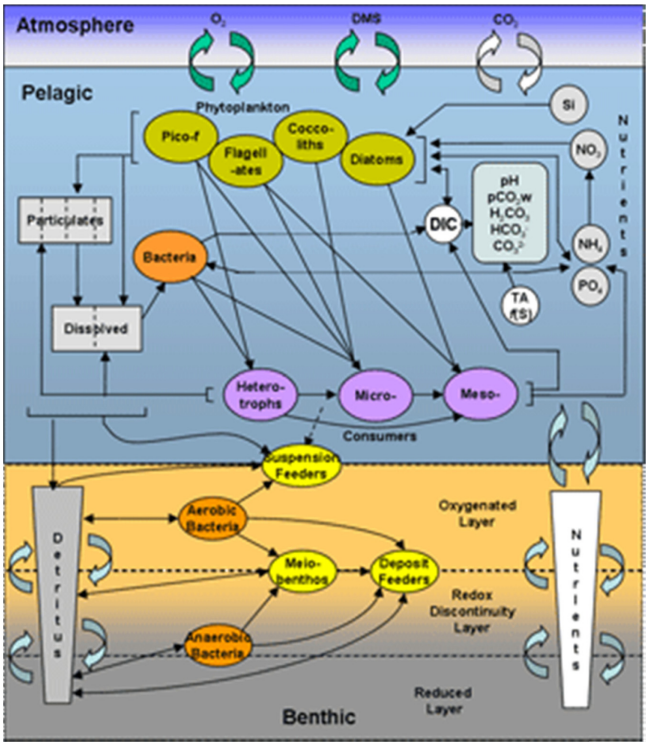

Fig. 6. Diagraom showing ecological processes of benthic-pelagic coupling used in European Regional Seas Ecosystem Models (ERSEM) (source: Wakelin *et al*. [2012]).

용존 산소 등의 환경인자들을 실제와 유사한 정도까지 예측하여 결과적으로 상위영양단계에 대한 예측이 가능하도록 설계되어 있다.

Fig. 6는 ERSEM에서 고려되고 있는 생태계 구성요소들의 상호연관성을 보여주는데, 상호작용을 설명하기 위한 기본적인 연산인자로 탄소, 질소, 인산염, 규산염, 산소를 고려한다(Wakelin *et al.* [2012]). 식물 플랑크톤의 경우 규조류와 비규조류(착편모조류나 극미소부유생물)의 PFT로 나누어 각 PFT에 대한 예측을 진행한다(Shutler *et al*. [2011]). 예를 들어, 규조류는 식물플랑크톤 중에 유일하게 규산염을 사용하기 때문에 모델에서 비교적 매개변수화(parameterize)하기 쉬운 편이다. 규조류가 축적한 일차생산물은 소형(micro) 또는 중형(meso) 동물플랑크톤(예, 요각류)의 먹이가 되어 상위 영양 단계로 에너지 전달이 진행된다. 유럽의 대륙붕 환경에서는 소형동물플랑크톤이 식물플랑크톤의 약 절반을 섭식하는 것으로 알려져 있다. 이 과정이 정확히 예측되기 위해서는 동물플랑크톤이 식물플랑크톤을 섭식(grazing)하는 과정을 예측하는 관계식이 매우 신중하게 선택되어야 하며, 이는 모델 적용 지역에 따라 다양해 질 수 있다. 이러한 생태적 기능과 더불어 중요한 인자로 영양염의 재광물화(remineralization) 과정을 들 수 있다. 따라서, 부유생태계 모델이 성공적으로 개발되기 위해서는 용존 유기물질(dissolved organic matter; DOM)을 포함하는 미세생물먹이망 과정, 재광물화를 통해 심해저로 유기물질이 전달되는 과정, 해저면에서 영양염 순환에 대한 저서 생태계 역할 등이 정확하게 이해되어야 한다. ERSEM은 이러한 생태적과정을 예측하기 위한 관계식을 모두 포함하고 있다.

ERSEM의 또다른 장점은 다양한 해양물리모델과 접합(coupling)될 수 있다는 점이다. 예를 들면, 1차원 GOTM(Global Ocean Turbulence Model) 모델부터 3차원 모델인 POLCOMS(Proudman Oceanographic Laboratory Coastal Ocean Modelling System)과 NEMO(Nucleus for European Modelling of the Ocean)에 접합된 바 있다(Shutler *et al.* [2011]; Edwards *et al*. [2012]). ERSEM은 해양물리모델로부터 수온, 염분, 혼합, 순환 등에 대한 해양물리환경 정보를 넘겨 받아 생지화학 모듈의 입력 자료로 사용하거나, 'aquarium' 모드를 통해서 ERSEM 자체 모델에 활용할 수 있다. Fig. 7과 8에 제시된 모델은 약 7 km 규모의 수평격자와 32개의 시그마 층 (σ) 으로 구성된 수직격자를 사용하는 3차원 모델을 사용하여 대서양 연안의 순일차생산량을 예측하는데 ERSEM이 적용된 예를 보여준다(Shutler *et al*. [2011]; Edwards *et al.* [2012]). 앙상블(ensemble) 접근 방법을 이용하여 대규모 해역에 적용한 Sinha *et al.* [2010]에 따르면 PFT 모델이 식물플랑크톤의 광생리적 특성을 고려하지 않은 단순한 NPZD 모델보다 더욱 우수한 성능을 보인다.

또한, ERSEM은 모델의 예측 오차를 줄이기 위해서 현장관측 자료나 위성관측 자료에 EnKF/SEIK/SEEK나 OI등의 자료동화 기법을 적용하여 모델 예측치를 보정하고 있으며, 이를 통해서 적조, 부영양화, 빈산소 환경의 발생을 예측할 수 있는 현업 전단계(pre-operational) 수준의 하위 영양 단계 경보 시스템을 갖추려는 노력을 병행하고 있기도 하다.

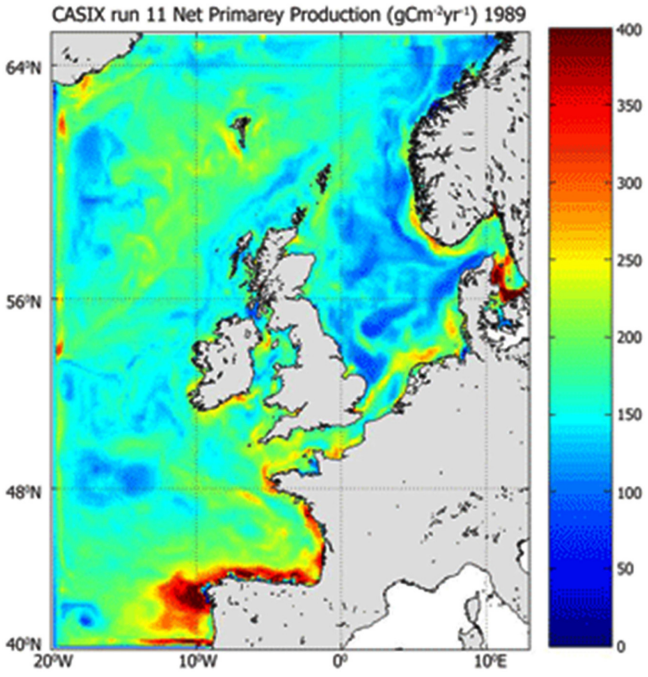

Fig. 7. Estimated net primary production by Atlantic Margin Model developed in Plymouth Marine Laboratory, UK (source: Shutler *et al*. [2012], http://www.meece.eu/library/ersem.html).

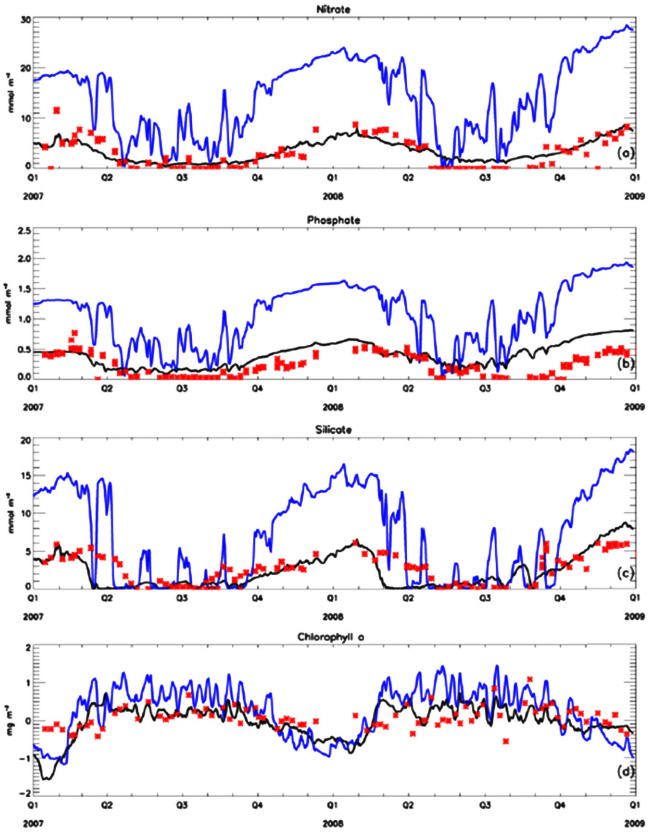

Fig. 8. Comparison of values estimated by two ecological models (blue and black lines) and of observations (red cross) (source: Edwards *et al*. [2012]).

3.3 새만금과 금강하구 생태현안 해결을 위한 생태모델 개발 방향

새만금 개발사업은 2006년 방조제 완공 이후 2020년 내부개발 1단계 완료를 목표로 하고 있으며, 새만금 방조제 신시갑문과 가력갑문 사이의 외측 해역에는 새만금 신항이 개발될 예정이다. 새만금 개발사업이 추진됨에 따라 이로 인한 해양환경의 악화와 환경관리 체계의 통합이 향후 해결해야 할 잠재적 환경현안으로 추정되고 있다. 현재의 새만금 환경관리 체계는 새만금 호 내측을 환경부가 담당하고 외측은 해양수산부에서 관리하는 이원화 구조 이며 환경관련 문제 발생시 이를 해결할 수 있는 협의체가 필요한 상황이다.

새만금 개발사업 기간 동안 새만금호 내측에서 발생한 환경 및 생태계 현안으로는 어패류 폐사, 해파리 발생, 적조 발생, 거품띠 발생 등을 들 수 있다. 어패류 폐사는 주로 용존산소 부족 및 수온 변화로 인해 발생한 것으로 추정되며, 수위조절로 인해 조간대에서 이매패류가 폐사하는 경우도 보고되었으며, 특히 토종 돌고래로 알려진 상괭이가 겨울철에 호수 내부에서 질식사한 경우 또한 보고되었다. 해파리의 경우 2010년에 보름달물해파리가 대량 번성한 바 있으며, 당시 현존량이 23억 6천만개체로 추정된 바 있다. 대번식의 원인은 해파리 폴립이 부착할 수 있는 방조제 사석이 증가한 때문인 것으로 여겨지고 있다. 환경부 발표에 따르면 당시 해파리가 외해로 확산되는 것을 방지하기 위해 선박 총 747척을 동원하여 총 531톤의 해파리가 구제되었다. 적조는 4-6월, 9-10월 중에 비정기적으로 발생하며 호수 내 정체수역이나 만경강과 동진강 하류에서 빈번하게 발생하고 있다. 새만금 호에서 발생한 거품띠는 착편모조류(haptophyte)와 같은 식물플랑크톤 증식으로 인한 것으로 여겨지며, 마치 물에 세제를 풀어놓은 듯한 거품이 해안가로 밀려들어 심미적으로 상당한 거부감을 주는 것으로 알려져 있다.

앞서 열거된 생태현안 중에서 해파리와 적조 발생이 향후 새만금 외해역 및 인근 금강하구의 환경현안으로 대두될 가능성이 클 것으로 보인다. 따라서 이 문제를 해결하기 위해서는 NPZD 모델이라 불리는 영양염 및 동식물플랑크톤 생물량을 추정할 수 있는 생태역학모델 개발이 선행되어야 할것으로 판단된다. NPZD 모델의 개발과정은 다음과 같은 4단계로 구성될 수 있다. 1단계는 적절한 시공간 규모의 관측조사를 통해 동식물플랑크톤 생물량의 생산, 소비, 분해에 관여하는 생태적 과정(ecological processes)을 이해하는 것이다. 생태 및 환경요인들 간의 관계를 도출하기 위해 앞장에서 소개된 다변량 통계기법이 활용될 수 있다. 입력변수와 출력변수의 관계가 비선형적인 경우는 두 변수를 가장 근사하게 매개하는 전환함수(transfer function)를 도출하는 신경망 기법을 활용할 수 있을 것이다. 2단계는 위에서 도출된 요인들 간의 관계를 수치화 시킨 지배방정식의 수립이며, 다음 3단계는 조사대상이 되는 상태변수들의 시간에 따른 공간 분포를 예측하기 위해 물리유동모델과 접합하는 과정이 될 것이다. 마지막 4단계에서 독립적인 관측자료를 이용하여 모델을 보정 및 검증하는 단계를 거침으로써 생태모델 구현이 완성되는 셈이다. NPZD 모델과 같이 하위 영양단계 역학모델은 이어 서술될 적조와 해파리 예측모델의 근간이 되

는 모델이기 때문에 적조와 해파리 출현의 예측 정확도를 높이기 위해서는 우수한 하위 영양단계 역학모델을 만드는 것이 매우 중요하다.

적조생물 출현 예측 모델도 개발 필요성이 높다 할 수 있다. 이 모델의 개발과정 또한 앞서와 마찬가지로 4단계로 구분해 볼 수 있다. 1단계는 적조생물 증감에 관여하는 생태적요인을 이해하기 위해 현장 생태자료를 분석하는 것이다. 이를 위해 충분한 관측자료가 획득되어야 하며, 경우에 따라 단종 배양 실험등을 통해 환경 요인과 적조생물종 간의 관계도 고찰되어야 한다. 2단계는 이러한 관측 및 실험 자료의 분석을 통해 적조생물 출현을 결정하는 환경 및 생태적요인의 통계함수모델을 수립하는 것이다. 3단계는 식물플랑크톤 생물량 역학모델과 2단계에서 개발된 통계함수모델을 결합하는 것이며, 마지막 4단계는 독립적으로 존재하는 관측자료를 통해 모델을 보정 및 검증하는 것이다. 이때 고려 대상이 되는 생태적 요인으로는 물리적 요인으로 수온, 염분, 부유퇴적물, 유동장 등이 있으며, 화학적 요인으로 무기영양염, 용존산소 등이 있다. 경쟁 및 포식/피식으로 나타나는 생물학적 요인으로는 식물플랑크톤, 원생동물플랑크톤, 후생동물플랑크톤의 종조성 등을 들 수 있다.

앞서 소개된 미국 체사피크만 해파리 예측모델에서 알 수 있듯이, 적절한 해파리 출현 예측 모델이 개발되기 위해서는 충분한 관측자료를 바탕으로 해파리 출현에 관여하는 생태적 요인을 추출하여 통계함수모델을 수립하는 것이 필요하다. 이렇게 개발된 통계함수모델에 식물플랑크톤 생물량 역학모델을 결합할 수 있으면 해파리 예측 모델이 더 고도화 될 수 있는데, 이 때 해파리 예측모델의 고려 대상이 되는 기본적 생태적 요인은 적조모델과 유사할 것으로 사료된다. 따라서, 충분한 관측자료를 확보하여 해파리 출현의 생태적과정을 정확하게 이해하는 것이 우수한 해파리 예측모델을 개발할 수 있는 전제조건이다.

새만금과 인접해 있는 금강하구는 1990년에 완공된 금강하구둑으로 인해 해수유통이 단절되어 있는 곳으로 영산강, 낙동강과 더불어 우리나라의 대표적인 막힌 하구이다. 해수유통 단절로 인한 하구역 생태계 변화가 가장 큰 환경현안으로 대두되고 있으나, 이는 지역간, 부처간 갈등을 유발하는 매우 복잡한 문제이기 때문에 본 논문에서는 논외로 한다. 해수유통문제를 제외하면 금강하구의 주요 환경 및 생태현안으로는 2010-2011년에 발생한 김황백화 현상, 퇴적환경 변화에 따른 갯벌 생물자원 감소 등을 들 수 있다. 금강하구의 김양식장은 비인만 일대의 약 4100 ha 면적에 64700여 책이 분포하고 있으며, 금강하구에서 김양식에 종사하는 어가수는 서천군과 군산시를 합하여 총 414가구인 점에 미루어 보아, 김황백화 현상에 따른 김 수확량 감소는 지역 경제에 심각한 영향을 줄 수 있는 환경 및 생태 현안으로 간주될 수 있다. 따라서, 김황백화 현상과 앞서 언급된 갯벌 이매패류 감소를 다룰 수 있는 생태모델 개발이 시급한 것으로 판단된다.

현재 김황백화의 원인으로는 일본에서의 유사 사례연구를 통해서 질산염 부족이 가장 유력한 요인일 것으로 예상되지만(Tada *et al.* [2010]), 향후 현장조사와 실험실 실험 등을 통해 명확한 원인이 규명된 이후에야 금강하구 김양식의 황백화 현상을 예측할 수 있는 모델 개발이 가능할 것이다. 더불어, 김 성장에 영향을 미치는 생태적 요인을 추출하고 이를 바탕으로 김 성장모델을 구축하는 것이 바람직 할 것이다. 이매패류 분포모델의 경우 조개 분포를 결정하는 생태적 요인을 고려한 통계함수모델을 구축한 후 물리화학적 요인을 예측하는 역학모델과 접합하는 과정을 통해서 가능할 것으로 사료된다. 이를 위해 갯벌에 서식하는 이매패류의 분포 및 이를 결정하는 환경요인 간의 물리-생물학적 관계를 파악하는 것이 선행되어야 한다. 또한 앞절에서 기술된 적조, 해파리 등 새만금 해역에서 개발 및 적용해야 할 생태모델들도 금강하구에서 시의적절하게 적용될 수 있을 것으로 추정된다.

거듭 강조하고 싶은 부분은 보다 정확한 모델의 구현(보정/검증을 포함)을 위해서는 현장에서 벌어지는 생태학적 현상에 대한 면밀한 고찰이 필요하다는 점이다. 생태모델은 이러한 관측 및 실험결과 등 선험적인 정보를 기반으로 전반적인 생태과정에 대한 가시화 및 예측을 하는 도구이다. 따라서, 모델 연구자들의 눈이 되어 줄 현장 및 실험 연구자들과의 밀접한 공동연구가 반드시 필요하다 하겠다. 현재, 새만금과 금강 하구역에서는 매주 해양 환경 및 생물 인자의 현장 관측이 2014년부터 주기적으로 이루어 지고 있으며, 국가에서 관리 중인 해양환경 측정망에서 장기간(1997년 ~ 현재)에 걸쳐 계절마다 수집된 자료도 존재하므로, 위에서 간략하게 언급했던 현안 중심의 문제 해결 지향적인 생태모델의 수립 및 구현에 비교적 유리한 여건이 형성되어 있다고 볼 수 있다.

4. 결 론

생태계는 물리화학적 반응과는 달리 일정한 외부 조건에 대해서 다양한 반응을 나타내기 때문에 이를 모델화하는 것이 매우 어렵다. 또한 역학모델로 모사할 수 있는 생태계 특성이 매우 제한적이어서 생태계 관리에 활용하기 어려운 측면도 있다. 생태계가 인간에게 주는 다양한 혜택을 미래 세대가 누릴 수 있도록 하기 위해서는 생태계기반 관리를 통해 생태계의 지속가능한 이용을 성취해야 하며, 이를 위해서는 다양한 시나리오를 바탕으로 생태현안 문제들을 진단하고 문제 해결에 도움이 될 수 있 생태모델이 개발되어야 한다. 정책적으로 활용가능한 생태모델을 개발하기 위해서는 생태현안에 대한 정의와 그에 대한 진단을 통한 정확한 원인 규명, 이렇게 취득된 정보를 바탕으로 어떠한 수준과 규모의 문제 해결 지향적인 모델의 수립할 것인지를 검토하여 결정해야 한다.

현재 우리나라 뿐 아니라 전세계적으로 연안관리에서 생태계의 중요성은 날로 증가하고 있다. 그만큼, 연안 생태계의 기능이 인간사회에 가져다 줄 수 있는 가치의 무한함을 인식하고 있다는 반증이다. 2006년에 제정된 해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률은 해양생태계 보호 및 보전을 통한 지속가능한 이용을 목적으로 정하고 있으며 생태계기반 관리의 개념을 잘 반영한 기본원칙을 포함하고 있다. 법률에서 정한 목적을 달성하기 위해 해양생물다양성을 보전하고, 훼손된 생태계를 복원하며, 해양 기초생산을 유지하

도록 되어 있는데, 이를 위해서는 생태적과정에 대한 보다 정확한 지식과 정보에 근거한 생태모델이 생태관리 및 의사 결정 도구로서 반드시 필요하다. 정책적으로 활용도가 높고 문제 해결 지향적인 생태모델을 개발하기 위해서는 우리나라 해양생태계 연구의 저변을 확대하고, 투자를 획기적으로 늘리며, 생태계 구조연구와 더불어 기능연구가 활성화 되어야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(하구역 종합관리시스템 개발 연구, 새만금 주변해역 해양환경 및 생태계관리 연구개발).

References

[1] Baretta, J.W., Ebenhoh, W. and Ruardij, P., 1995, “The european regional seas ecosystem model, a complex marine ecosystem model”. Neth. J. Sea Res. Vol. 33, 233-246.

[2] Bissett, W.P., Walsh, J.J., Dieterle, D.A. and Carder, K.L., 1999a, “Carbon cycling in the upper waters of the Sargasso Sea: I. Numerical simulation of differential carbon and nitrogen fluxes”, Deep-Sea Research, Vol. 46, 205-269.

[3] Bissett, W.P., Carder, K.L., Walsh, J.J. and Dieterle, D.A., 1999b, “Carbon cycling in the upper waters of the Sargasso Sea: II. Numerical simulation of apparent and inherent optical properties”, Deep-Sea Research, Vol. 46, 271-317.

[4] Bissett, W.P., DeBra, S. and Dye, D., 2004, Ecological Simulation (EcoSim) 2.0 Technical Description. Florida Environmental Research Institute, Tampa. http://www.flenvironmental.org/publications_ppts/FERI_2004_0002_U_D.pdf.

[5] Bissett, W., Arnone, R., DeBra, S., Dieterle, D., Dye, D., Kirkpatrick, G., Schofield, O. and Vargo, G., 2005, “Predicting the optical properties of the West Florida Shelf: Resolving the potential impacts of a terrestrial boundary condition on the distribution of colored dissolved and particulate matter”, Marine Chemistry, Vol. 95, No. 3-4, 199-233.

[6] Blackford, J.C., Allen, J.I. and Gilbert, F.J., 2004, “Ecosystem dynamics at six contrasting sites: a generic model study”, Journal of Marine Systems, Vol. 52, 191-215.

[7] Blower, S. and Roughgarden, J., 1987, “Population dynamics and parasitic castration: a mathematical model”, American Naturalist, Vol. 129, 730-754.

[8] Boyd, I.L., 2012, “The art of ecological modeling”, Science, Vol. 337, No. 6092, 306-307.

[9] Brown, C.W., Ramers, D.L., Hood, R.R., Wazniak, C., Long, W. and Tango, P., (unpublished), “Predicting the abundance of the dinoflagellate Karlodinium veneficum in the Chesapeake Bay”.

[10] Budgell, W.P., 2005, “Numerical simulation of ice-ocean variability in the Barents Sea region”, Ocean Dynamics, Vol. 55, 370-387.

[11] Carpenter, S.R., Cole, J.J., Pace, M.L., Batt, R., Brock, W.A., Cline, T., Coloso, J., Hodgson, J.R., Kitchell, J.F., Seekell, D.A., Smith, L. and Weidel, B., 2011, “Early warnings of regime shifts: a whole-ecosystem experiment”, Science, Vol. 332, 1079-1082.

[12] Christensen, V., Walters, C.J., Ahrens, R., Alder, J., Buszowski, J., Christensen, L.B., Cheung, W.W.L., Dunne, J., Froese, R., Karpouzi, V., Kaschner, K., Kearney, K., Lai, S., Lam, V., Palomares, M.L.D., Peters-Mason, A., Piroddi, C., Sarmiento, J.L., Steenbeek, J., Sumaila, R., Watson, R., Zeller, D. and Pauly, D., 2009, “Database-driven models of the world’s Large Marine Ecosystems”, Ecological Modeling, Vol. 220, No. 17, 1984-1996.

[13] Constable, A.J., 1999, “Ecology of benthic macro-invertebrates in soft-sediment environments: A review of progress towards quantitative models and predictions”, Australian Journal of Ecology, Vol. 24, 452-476.

[14] Constantin de Magny, C., G., Long, W., Brown, C.W., Hood, R.R., Huq, A., Murtugudde, R. and Colwell, R.R., 2009, “Predicting the distribution of *Vibrio* spp. in the Chesapeake Bay: A *Vibrio cholerae* case study”, Ecohealth, Vol. 6, 378-389.

[15] Conway, F., and Opsommer, L., 2007, “Communicating and interacting with Oregon’s coastal marine recreational fishing community”. Fisheries, Vol. 32, 182-188.

[16] Cury, P.M., Boyd, I.L., Bonhommeau, S., Anker-Nilssen, T., Crawford, R.J.M., Furness, R.W., Mills, J.A., Murphy, E.J., Osterblom, H., Paleczny, M., Piatt, J.F., Roux, J.-P., Shannon, L. and Sydeman, W., 2011, “Global seabird response to forage fish depletion-one third for the birds”, Science, Vol. 334, 1703-1706.

[17] Dai, L., Vorselen, D., Korolev, K.S. and Gore, J., 2012, “Generic indicators for loss of resilience before a tipping point leading to population collapse”, Science, Vol. 336, 1175-1177.

[18] Davos, C.A., Jones, P.J.S., Side, J.C., Siakavara, K., 2002, “Attitudes toward participation in cooperative coastal management: four European case studies”. Coastal Management, Vol. 30, 209-220.

[19] Decker, M. B., Brown, C. W., Hood, R.R., Purcell, J.E., Gross, T.F., Matanoski, J.C., Bannon, R.O. and Setzler-Hamilton, E.M., 2007, “Predicting the distribution of the scyphomedusa, *Chrysaora quinquecirrha*, in Chesapeake Bay”, Marine Ecology Progress Series, Vol. 329, 99-113.

[20] Di Lorenzo, E., 2003, “Seasonal dynamics of the surface circulation in the southern California Current System”, Deep-Sea Research, Part II, Vol. 50, 2371-2388.

[21] Dinniman, M.S., Klinck, J.M. and Smith, W.O. Jr., 2003, “Cross shelf exchange in a model of the Ross Sea circulation and biogeochemistry”, Deep-Sea Research, Part II, Vol. 50, 3103-3120.

[22] Edwards, K.P., Barciela, R., and Butenschon, M., 2012, “Validation of the NEMO-SRSEM operational ecosystem model for the North West European Continental Shelf”, Ocean Science, Vol. 8, 983-1000.

[23] Elsner, J.B. and Tsonis, A.A., 1992, “Nonlinear prediction, chaos, and noise”, Bulletin of the American Meteorological Society,

Vol. 73, 49-60.

[24] Eppley, R.W., 1972, Temperature and phytoplankton growth in the sea. Fisheries Bulletin, 70, 1063-1085.

[25] Franks, P.J.S., Wroblewski, J.S. and Flierl, G.R., 1986, "Behavior of a simple plankton model with food-level acclimation by herbivores", Marine Biology, Vol. 91, 121-129.

[26] Fennel, K., Wilkin, J., Previdi, M. and Najjar, R., 2008, "Denitrification effects on air-sea CO_2 flux in the coastal ocean: Simulations for the Northwest North Atlantic", Geophysical Research Lettter, Vol. 35, L24608.

[27] Fennel, K., Wilkin, J., Levin, J., Moisan, J., O'Reilly, J. and Haidvogel, D., 2006, "Nitrogen cycling in the Middle Atlantic Bight: Results from a three-dimensional model and implications for the North Atlantic nitrogen budget, Global Biogeochem. Cycles", Vol. 20, GB3007, doi:10.1029/2005GB002456.

[28] Freedman, G.I., 1980, Deterministic Mathematical Models in Population Ecology, Marcel Dekker, New York, 3-19.

[29] Gross, L., Thiria, S., Frouin, R. and Mitchell, B.G., 2000, "Artificial neural networks for modeling the transfer function between marine reflectance and phytoplankton pigment concentration", Journal of Geophysical Research, Vol. 105, 3483-3495.

[30] Haidvogel, D.B., Arango, H.G., Hedstrom, K., Beckmann, A., Malanotte-Rizzoli, P. and Shchepetkin, A.F., 2000, "Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: Simulations in nonlinear terrain-following coordinates", Dynamics of Atmospheres and Oceans, Vol. 32, 239-281.

[31] Holt, J.T., Allen, J.I., Proctor, R. and Gilbert, F., 2005, "Error quantification of a high resolution coupled hydrodynamic-ecosystem coastal-ocean model: part 1. Model overview and assessment of the hydrodynamics". J. Mar. Syst., Vol. 57, 167-188.

[32] Holt, J., Harle, J., Proctor, R., Michel, S., Ashworth, M., Batstone, C., Allen, I., Holmes, R., Smyth, T., Haines, K., Bretherton, D., and Smith, G., 2009, "Modelling the global coastal ocean". Philosophical Transactions of the Royal Society A., Vol. 367, 939-951.

[33] Hooper, D.U., Chapin III, F.S., Ewel, J.J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J.H., Lodge, D.M., Loreau, M., Naeem, S., Schmid, B., Setala, H., Symstad, A.J., Vandermeer, J. and Wardle, D.A., 2005, "Effects of biodiversity on ecosystem functioning: A consensus of current knowledge", Ecological Monographs, Vol. 75, No. 1, 3-35.

[34] Jacobs, J. M., Rhodes, M. , Brown, C.W., Hood, R.R., Leight, A., Long, W. and Wood, R., 2010, "Predicting the distribution of *Vibrio vulnificus* in Chesapeake Bay", NOAA Technical Memorandum NOS NCCOS. 112. 12 pp.

[35] Jiang, W. and Gibbs, M.T., 2005, "Predicting the carrying capacity of bivalve shellfish culture using a steady, linear food web model", Aquaculture, Vol.244, 171-185.

[36] Keiner, L.E. and Brown, C.W., 1999, "Estimating oceanic chlorophyll concentrations with neural networks", International Journal of Remote Sensing, Vol. 20, 189-194.

[37] Kim, H.-C. and Cho, Y.-G., 2013, "A brief introduction to marine ecosystem modeling", The Sea, Vol. 18, 21-31. (in Korean)

[38] Kim, T.-W., Lee, K., Najjar, R.G., Jeong, H.-D. and Jeong, H.J., 2011, "Increasing N abundance in the northwestern Pacific ocean due to atmospheric nitrogen deposition", Science, Vol. 334, 505-509.

[39] Kim, Y.H., Im, J., Ha, H.K., Choi, J.-K., Ha, S., 2014, "Machine learning approaches to coastal water quality monitoring using GOCI satellite data", GIScience and Remote Sensing, Vol. 51, No. 2, 158-174.

[40] Kishi, M.J., *et al*., 2007, "Nemuro - a lower trophic level model for the North Pacific marine ecosystem", Ecological Modelling, Vol. 202, 12-25.

[41] Krasnopolsky, V.M., 2013, The Application of Neural Networks in the Earth System Sciences. Neural Network Multidimensional Mappings, Springer.

[42] Krasnopolsky, V.M., Gemmill, W.H. and Breaker, L.C. 2000, "A neural network multiparameter algorithm SSM/I ocean retrievals: comparisons and validations", Remote Sensing of Environment, Vol. 73, 133-142.

[43] Levin, S.A., 1998, "Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems", Ecosystems, Vol. 1, 431-436.

[44] Lotka, A.J., 1925, Elements of Physical Biology, Williams and Wilkins.

[45] Malthus, T.R., 1798, An Essay on the Principle of Population, Johnson, London.

[46] Marchesiello, P., McWilliams, J.C. and Shchepetkin, A., 2003, "Equilibrium structure and dynamics of the California Current System", Journal of Physical Oceanography, Vol. 33, 753-783.

[47] McLeod, K.L., Lubchenco, J., Palumbi, S.R., Rosenberg, A.A., 2005, "Scientific consensus statement on marine ecosystem-based management". Signed by 217 academic scientists and policy experts with relevant expertise and published by the Communication Partnership for Science and the Sea at http://compassonline.org/?q=EBMS; 2005.

[48] McLeod, K. and Leslie, H., 2009, Ecosystem-based management for the oceans. Washington, DC: IslandPress.

[49] Midgley, G.F., 2012, "Biodiversity and ecosystem function", Science, Vol. 335, No. 6065, 174-175.

[50] Odum, E., 1953, Fundamentals of ecology, Saunders, Philadelphia, 383 p.

[51] Pearson, T.H. and Rosenberg, R., 1978, "Macrobenthic succeession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment", Oceanography and Marine Biology- an Annual Review, Vol. 16, 229-311.

[52] Peliz, A., Dubert, J., Haidvogel, D.B. and Le Cann, B., 2003, "Generation and unstable evolution of a density-driven Eastern Poleward Current: The Iberian Poleward Current", Journal of Geophysical Research, Vol. 108, No. C8, 3268, doi:10.1029/2002JC001443.

[53] Powell, T. P., Lewis, C. V. W., Curchister, E. N., Haidvogel, D. B., Hermann, A. J. and Dobbins, E. L., 2006, "Results from a three-

dimensional, nested biological-physical model of the California Current System and comparisons with statistics from satellite imagery", Journal of Geophysical Research, Vol. 111, No. C7, C07018, doi:10.1029/2004JC002506.

[54] Riley, G.A., 1946, "Factors controlling phytoplankton populations on Georges Bank", Journal of Marine Research, Vol. 6, 54-73.

[55] Rhoads, D.C., Young, D.K., 1970, "The influence of deposit-feeding organisms on sediment stability and community trophic structure", Journal of Marine Research, Vol. 28, 150-178.

[56] Roux, D.J., Rogers, K.H., Biggs, H.C., Ashton, P.J., and Sergeant, A., 2006, "Bridging the science-management divide: moving from unidirectional knowledge transfer to knowledge interfacing and sharing". Ecology and Society, Vol. 11, [online] URL: http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art4/.

[57] Rowe, G. and Frewer, L.J., 2000, "Public participation methods: a framework for evaluation". Science, Technology, and Human Values, Vol. 25, 3-29.

[58] Ryu, J., Leschine, T.M., Nam, J., Chang, W.K., Dyson, K., 2011a, "A resilience-based approach for comparing expert preferences across two large-scale coastal management programs", Journal of Environmental Management, Vol. 92, 92-101.

[59] Ryu, J., Kim, H.-C., Khim, J.S., Kim, Y.H., Park, J., Kang, D., Hwang, J.H., Lee, C.-H. and Koh, C.-H., 2011b, "Prediction of macrozoobenthic species distribution in the Korean Saemangeum tidal flat based on a logistic regression model of environmental parameters", Ecological Research, Vol. 26, 659-668.

[60] Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W.A., Brovkin, V., Carpenter, S.R., Dakos, V., Held, H., van Nes, E.H., Rietkerk, M. and Sugihara, G., 2009, "Early-warning signals for critical transitions", Nature, Vol. 461, 53-59.

[61] Shutler, J.D., Smyth, T.J., Saux-Picart, S., Wakelin, S.L., Hyder, P., Orekhov, P., Grant, M.G., Tiltone, G.H. and Allen J.I., 2011, "Evaluating the ability of a hydrodynamic ecosystem model to capture inter- and intra-annual spatial characteristics of chlorophyll-a in the north east Atlantic", Journal of Marine Systems, Vol. 88, 169-182.

[62] Sinha, B., Buitenhuis, E.T., Quere, C.L. and Anderson, T.R., 2010, "Comparison of the emergent behavior of a complex ecosystem model in two ocean general circulation models", Progress in Oceanography, Vol. 84, 204-224.

[63] Steele, J.H. and B.W. Frost, 1977, "The structure of plankton communities", Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 270, 485-534.

[64] Tada, K., Fujiwara, M., Honjo, T., 2010, "Water quality and nori (*Porphyra*) culture in the Seto Inland Sea", Bunseki Kagaku, Vol. 59, 945-955.

[65] Thorson, G., 1950, "Reproduction and larval ecology of marine bottom invertebrates", Biological Review, Vol. 25, 1-45.

[66] Thrush, S.F., Hewitt, J.E., Herman, P.M.J., Ysebasert, T., 2005, "Multiscale analysis of species-environment relationships", Marine Ecology Progress Series, Vol. 302, 13-26. Vann, L. and Hu, Y., 2002, "A neural network inversion system for atmospheric remote-sensing measurements", Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2002. IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE, Vol. 2, 1613-1615.

[67] Veraart, A.J., Faassen, E.J., Dakos, V., van Nes, E.H., Lurling, M. and Scheffer, M., 2012, "Recovery rates reflect distance to a tipping point in a living system", Nature, Vol. 481, 357-359.

[68] Verhulst, P.-F., 1838, "Notice sur la loi que la population poursuit dans son accroissement", Correspondance mathématique et physique, Vol. 10, 113-121.

[69] Volterra, V., 1926, "Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically", Nature, Vol. 118, No. 2972, 558-560.

[70] Wakelin, S. L., J. T. Holt, J. C. Blackford, J. I. Allen, M. Butenschön, and Y. Artioli, 2012, "Modeling the carbon fluxes of the northwest European continental shelf: Validation and budgets", J. Geophys. Res., Vol. 117, C05020, doi:10.1029/2011JC007402.

[71] Walsh, J.J., 1972, "Implications of a systems approach to oceanography", Science, Vol. 176, 969-975.

[72] Warner, J. C., W. R. Geyer, and J. A. Lerczak, 2005a, "Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment", J. Geophys. Res., 110, C05001, doi: 10.1029/2004JC002691.

[73] Warner, J.C, Sherwood, C.R., Arango, H.G. and Signell, R.P., 2005b, "Performance of four turbulence closure methods implemented using a generic length scale method", Ocean Modelling, Vol. 8, 81-113.

[74] Warwick, R.M., 1986, "A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities", Marine Biology, Vol. 92, 557-562

[75] Wilkin, J.L., Arango, H.G., Haidvogel, D.B., Lichtenwalner, C.S., Glenn, S.M. and Hedstrom, K.S., 2005, "A regional ocean modeling system for the long-term ecosystem observatory", Journal of Geophysical Research, Vol. 110, C06S91, doi: 10.1029/2003JC002218.

[76] Ysebaert, T., Meire, P., Herman, P.M. and Verbeek, H., 2002, "Macrobenthic species response surfaces along estuarine gradients: prediction by logistic regression", Marine Ecology Progress Series, Vol. 225, 79-95.

Received 6 April 2015
Revised 13 May 2015
Accepted 3 July 2015