환경영향평가 제21권 제3호(2012) pp.461~468

연구논문

연안해역의 환경변화에 따른 저차 생태계 Pulsing Simulation 예비 진단

이 대 인
국립수산과학원 해역이용영향평가센터
(2012년 4월 19일 접수, 2012년 5월 21일 승인)

Preliminary Diagnosis for Pulsing Simulation of Low Trophic Ecosystem by Environmental Changes in Coastal Area

Dae-In Lee
Marine Environmental Impact Assessment Center, National Fisheries Research & Development Institute
(Manuscript received 19 April 2012; accepted 21 May 2012)

Abstract

In general, long-term changes of ecological factors take a pulse form in which they interact with other factors and go through a repeated increasing and decreasing cycle. The coupling of the two approaches the grid model and the box model in ecological modeling can lead to an in-depth understanding of the environment. The study analyzes temporal variations of major storages with an energy system model that formulizes effectively the relationships among nutrients, phytoplankton, and zooplankton in the Yellow Sea and the East China Sea. An increase of light intensity and standing stock of nutrient increase the magnitude and frequency of pulsing. Also, an immense reduction of nutrient concentration can cause extinction of the pulsing and bring about a steady state. It is concluded that the nutrient loads in freshwater discharge from the Yangtze affect the cycles of major ecological components as well as water quality variables and play an important role in the marine ecosystem.

Keywords : Pulse, Energy system model, Nutrient, Phytoplankton, Zooplankton, Yellow Sea and the East China Sea

Corresponding Author: Dae-In Lee, Marine Environmental Impact Assessment Center, National Fisheries Research & Development Institute, Busan, 619-705, Korea Tel: +82-51-720-2961 Fax: +82-51-720-2969 E-mail: dilee@nfrdi.go.kr

I. 서 론

해양환경에 있어서 영양염류 공급량의 변화 등 인위적인 변동 요인에 따른 저차 생태계 구성요소의 응답성에 대한 예측은 주로 생태계 모델링 또는 부영양화 모델링에 의해 이루어지고 있다. 해양생태계는 생산자, 소비자와 분해자로 구성된 생물학적 요소, 물질과 에너지로 구성된 비생물적 요소와의 물리학적, 생지화학적 상호작용 등이 매우 복잡하게 관여되어 있어서 각 구성요소에 대한 정확한 예측은 매우 어렵다. 기초적인 조사 자료가 확보되지 않고, 물질순환에 대한 제반 메커니즘이 충분히 규명되지 않는 상태에서 대부분의 연구에서는 다양한 가설과 조건을 설정해서 목표로 하는 예측인자를 중심으로 시스템을 단순화시키고, 이용하는 모델의 특성을 고려하여 단계적으로 접근하고 있다. 장래 환경변화에 따라서 해양환경이 어떻게 반응하고, 이러한 변화를 유발시키는 가장 큰 원인을 추적하며, 적정 관리방안을 수립하기 위해서는 이러한 생태계모델링이 필수적이다.

해양생태계내에서도 영양염류 등 수질인자와 직접적 상관성을 가지는 기초 생산자인 식물플랑크톤을 중심으로 한 저차생태계에 대한 모델링은 국내 · 외적으로 많이 수행되어져 왔는데, 부영양화에 대한 모델결과는 연안오염 및 수질관리정책에 직접적으로 적용되고 있다. 최근에는 갯벌 생태계 및 수산자원의 변동에 대한 알고리즘을 개발하거나 기후변화에 따른 생태계 반응을 연구하는데 이용되고 있는 상황이다. 해양의 수질관리적 차원에서 영양염류의 변화는 식물플랑크톤의 성장, 즉 자생적인 유기물의 증감에 상당한 영향을 미치고 있는 것으로 알려지고 있다. 영양염류와 식물플랑크톤 등은 자연적인 조건에서 규칙적인 증감 형태, 즉 시간 변동성을 가지며, 공간적으로 그 양상이 다르게 나타난다. 그러나, 인위적인 개발이나 활동은 이러한 자연적인 변화양상을 저해할 수 있다.

일반적으로 생태계 요인들의 장기적인 변동은 다른 인자와 상호작용을 하면서 증가와 감소를 지속적으로 반복하는 펄스(Pulse) 형태를 지니고 있다(Odum *et al.*, 1995). 영양염류 공급원의 변화와 이에 따른 농도의 증감은 연안해역의 생물생산 등에 큰 영향을 미치고, 결과적으로 종의 천이 또는 현존량의 변화를 일으켜 또 다른 펄싱(Pulsing)을 초래할 수 있다(Caffrey *et al.*, 2007; Yamamoto & Hatta, 2004). 이러한 영양염류의 펄싱은 해역에서 저차생태계의 생산과 소비차원에서 중요한 요인인데, 특히 본 연구해역에서는 양쯔강으로부터의 담수유입이 중요한 기여를 할 것으로 판단된다. 영양염류의 펄스가 한 생물 종에 미치는 영향에 대해서는 연구되었지만, 영영염류의 공급 변화에 따라 우점 식물플랑크톤이 변할 수 있는가 등 연쇄적인 환경변화에 대한 예측 연구는 부족하다(Freund *et al.*, 2006). 따라서 장래 환경변화가 중장기적으로 해양생태계에 어떤 영향을 미치는 가를 파악하기 위한 사전 연구로서 펄스모델의 예비 구축은 중요할 것이다.

선행 연구에서는 황해 및 동중국해에서 격자시스템을 이용한 3차원 생태계모델을 이용해서 하계의 평균적인 COD, DIN, DIP와 Chl. a 농도의 공간적 분포를 시뮬레이션하고 평가하였다(이, 2012). 그러나, 산샤댐 구축 등과 같은 대규모 환경변동에 따른 영양염류의 공급 변동에 따라서 주변 생태계 구성요소의 펄스에 미치는 영향진단은 시도되지 않았다. 종 다양성이 풍부한 안정적인 생태계가 댐 건설 등 외부 환경변화에 따라서 생태계의 이질성을 초래하고 종 다양성을 막을 수 있다는 점에서 이러한 영향평가는 중요할 것이다. 이러한 관점에서 생태계 요소들과 메커니즘을 포함하는 에너지시스템학적 미니모델은 중장기적인 변화의 정량적인 결과를 이해하는데 효과적인 도구이다(Kent *et al.*, 2000). 에너지시스템 모델은 자연생태계에서 일어나는 에너지 및 물질의 흐름과 변화과정 뿐만 아니라 인간과의 유기적 상호관계를 과학적이고 정량적으로 파악할 수 있다. 특히, 해양에서의 펄스현상에 대한 연구는 Kang(1998)에 의해 모델이 적용된 바 있다.

따라서 본 연구는 외부환경의 변화요인에 따른

해양수질 등이 민감하게 반응할 수 있는 대상해역에서 선행 연구한 공간격자상의 생태계모델에서 평가된 요인들을 에너지시스템 모델의 하나인 PULSE 모델에 연계시켜 저차생태계 구성요소의 중장기적 펄스변화와 영향을 진단하였다. 즉, 황해 및 동중국해의 특정 공간에서 생태계모델에 의해 도출된 영양염류, 식물플랑크톤과 동물플랑크톤 현존량 등의 값과 흐름을 에너지시스템 모델에 적용하여 장기적인 변동추이와 환경변화에 따른 펄스의 변화양상을 파악하였다.

II. 재료 및 방법

1. 에너지 시스템 모델링

해양생태계라는 시스템의 변화과정을 좀 더 중장기적으로 이해하고 평가하기 위해서는 구성요소들 간의 상호작용을 특정 시점에 국한해서 평균적으로 해석하기보다는 시간의 함수로 다이나믹한 관점에서 살펴볼 필요가 있다. 연안해역에서 수질인자와 식물플랑크톤 현존량 등의 변동을 살펴보면, 진폭과 주기를 가지면서 일정한 패턴으로 변화되는 과정, 즉 Pulse 형태의 변화가 나타나고 있다. 최근에는 Pulsing에 관한 관심이 증가하고 있으며 많은 연구가 이루어졌다(Ascioti *et al.*, 1993; Balch, 1981; Berman *et al.*, 1995; Holligan *et al.*, 1985).

에너지시스템 모델은 연구해역을 하나의 일정한 영역(Box)으로 설정하고, 그 영역내에서 주요 storage에 대한 물질과 에너지 흐름을 수식화해서 시뮬레이션하는 도구로 Top-down 방식, 즉 생태계 요소의 분포와 변화량을 구체적으로 그리고 공간적으로 평가하기 전에 전체적이고 장기적인 순환양상을 파악하는데 많이 이용되고 있다(Odum, 1983; Odum & Peterson, 1996). 에너지시스템 언어를 가진 모델링은 최근에는 생태계와 경제부문에 대한 예측을 위해 다이아그램화된 46개의 미니모델들이 적용되고 있다(Odum & Odum, 1994).

에너지시스템 다이아그램은 어떤 영역내에서의 저장소와 흐름 및 상호작용을 하나의 시스템 네트워크로 나타낸다. 에너지시스템 모델링은 우선, 대상 시스템의 경계를 정하고, 시스템의 외부에서 시스템에 영향을 미치는 주요 요소들을 파악한 후, 내부요소와 외부요소 사이를 연결하는 주요 흐름(물

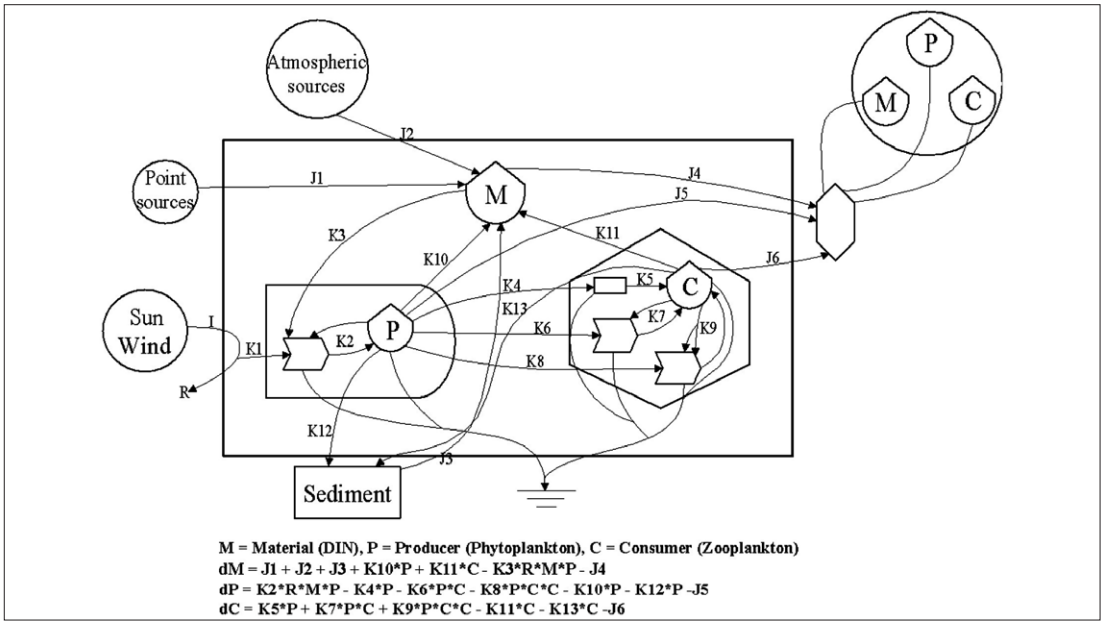

Fig. 1. Energy systems diagram and differential equations for the mini-model PULSE

질과 에너지)에 대한 다이어그램을 작성한다. 그리고 모델의 수식화, 모델의 검 · 보정을 통하여 작성된 프로그램을 이용한 후 시뮬레이션을 수행한다(강, 2010; 오 등, 2008).

본 연구에서는 에너지시스템 모델 중에서 영양염류 및 이와 관계된 저서생태계 구성요소의 변동과 중장기적인 변화를 해석하기 위해 영양염류-식물플랑크톤-동물플랑크톤의 에너지 흐름을 단순화시켜 미니모델 PULSE을 구축하였다(Fig. 1). 각 요인들의 식은 에너지시스템 다이아그램으로부터 정의하였다. 선행연구지역인 황해 및 동중국해의 공간은 매우 넓기 때문에 시스템의 경계를 그 전체 영역을 모두 포함해서 설정하는 것은 공간적 특성이 다양하므로 비합리적일 것이다. 앞선 생태계모델에서 적용한 격자시스템 중 양쯔강 하구 외측과 제주도 남측사이의 영역이 환경변화에 응답성이 민감하여 대상지역으로 경계를 지었다. 설정된 지역은 격자상 x, y 방향으로 약 9.26 km, 수층은 표층(0~20 m)을 고려했으므로 경계역의 총 부피는 약 1.715×106 m^3에 해당한다. 내부 시스템의 구성요소는 대상해역의 제한인자인 용존무기질소(M)를 중심으로 식물플랑크톤(P)와 동물플랑크톤(C)를 고려하였다. 외부 인자로는 태양과 바람을 포함한 Renewable source, 육상 점원 오염원, 대기 및 해저 퇴적물을 고려하였다. 주요 각 Storage에 대한 물질흐름과 에너지 이동을 고려한 수식화는 Kang(1998)의 자료를 참고하였다.

2. 모델의 계산 및 검 · 보정

모델링의 위해 시스템내의 주요 Storage(영양염류(M), 식물플랑크톤(P), 동물플랑크톤(C))의 현존량과 계수 값을 Table 1에 나타내었다. 각 Storage에 대한 현존량은 선행 생태계모델에 의해 대상지역에서 계산된 농도 값과 경계구역의 부피를 고려하여 계산하였고, 모두 탄소량으로 전환하였다. 황해와 동중국해에 있어서 영양염류는 양쯔강에 의한 공급이 중요하고, 이와 함께 연안에서 멀리 떨어진 해역에서는 대기 침적을 통한 공급량도 매우 중요한 것으로 평가되고 있다. 이러한 영양염류의 부하량 크기에 따라 물질의 농도 및 생태계의 반응의 정도가 달라질 수 있을 것이다. 영양염류는 질소를 대상으로 하였고, 일사량과 관계된 I와 R은 문헌자료를 참조하였다. 이러한 값들과 Kang(1998)의 결과를 참조하여 모델을 검 · 보정하여 k-value를 결정

Table 1. Input values and coefficient calibrations for the PULSE model

Definition	Input values		
Volume of boundary	1.715 × 106 m^3		
Sources	I = 100%	R = 10%	
Storages	M = 192.1 kg	P = 325.8 kg	C = 65.2 kg
Coefficients	K1*R*M*P = 4,500	K1 = 0.00014	
	K2*R*M*P = 81.45	K2 = 0.0000026	
	K3*R*M*P = 313.0	K3 = 0.00001	
	K4*P = 3.258	K4 = 0.01	
	K5*P = 1.629	K5 = 0.005	
	K6*P*C = 16.29	K6 = 0.00077	
	K7*P*C = 5.86	K7 = 0.00028	
	K8*P*C*C = 277.0	K8 = 0.0002	
	K9*P*C*C = 65.16	K9 = 0.000047	
	K10*P = 16.29	K10 = 0.05	
	K11*C = 32.6	K11 = 0.5	
	K12*P = 1.0	K12 = 0.003	
	K13*C = 1.0	K13 = 0.015	

하였다. 구축한 모델은 BASIC 언어 또는 엑셀 비쥬얼을 이용하여 시뮬레이션하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 영양염류(M)–식물플랑크톤(P)–동물플랑크톤(C)의 Pulsing simulation

펄스모델을 이용해서 대상지역에서의 영양염류, 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤의 변화과정을 모델링한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 약 2년 동안의 시뮬레이션 기간에서 각 요소들의 펄스형태의 변동패턴을 재현하였다. 식물플랑크톤 현존량은 일사량 에너지와 영양염류를 이용해서 천천히 증가되고, 영양염류는 이에 따라 점차 감소하였다. 식물플랑크톤 현존량은 대략 1년에 2–3번의 bloom을 가지는 Pulse cycle이 예측되었는데, 최대 값은 약 600kgC/m^3, 최소는 약 30kgC/m^3을 나타내었다. 동물플랑크톤 현존량은 10~100kgC/m^3 범위로 식물플랑크톤 peak와 일정한 시간지체를 보이면서 2–3회 pulse를 보여주었고, 영양염류는 10~30kgN/m^3 범위로 식물플랑크톤이 최대일 때는 최소, 최소일 때는 최대의 펄싱을 보였다. 이러한 분포는 세 요인의 구조적인 상관성과 밀접히 관련이 있고, 일반적인 변동특성을 나타낸다고 할 수 있다.

시간에 따라 변화되는 빛과 영양염류의 공급형태가 식물플랑크톤에 영향을 미치고, 시간, 일, 계절, 년별로 변동되는 패턴을 보여준다. 영양염류의 공급증가에 따라 식물플랑크톤의 생물량이 증가하므로 강우량 증가는 영양염 농도의 펄스를 이끌 수 있기 때문에 중요한 요인이 될 수 있을 것이다. 본 연구에서 적용한 펄스모델은 대략적인 개념에서 생태계 구성인자의 펄스 형태의 재현과 적용성을 진단하는 단계이므로 향후 중장기적이고 지속적인 관측 데이터의 확보를 통해서 세부 구성인자의 Pulsing interval과 peak를 연구하여야 할 것으로 판단되었다.

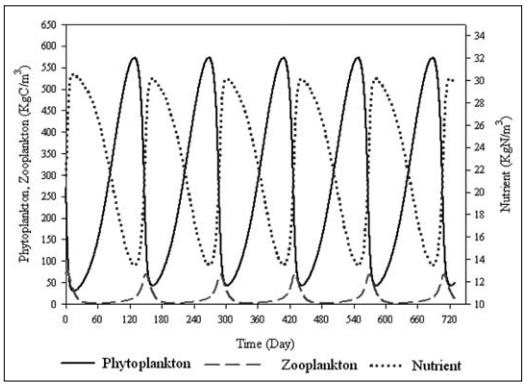

Fig. 2. Simulation results of the model PULSE

2. 일사량 및 오염부하량 변동에 따른 펄스의 변화

PULSE 모델링에 의하면 육상 및 대기공급 등을 통한 대상해역의 영양염류 농도의 변화는 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 현존량 변화와도 밀접한 상관성을 가지면서 반복적인 증감 양상을 보여주고 있다. 이러한 자연적인 상황에서 환경영향 인자가 변동될 때, 저차생태계의 구성요소가 어떻게 변화될 것인지에 대해 사전 평가하였다. 여러 가지 환경변화 시나리오를 설정해 볼 수 있으나, 본 논문에서는 우선적으로 최근 대상해역이 대규모 산샤댐 건설에 따른 영향이 중요한 사항이므로 인위적인 수문개폐에 따라 발생할 수 있는 영양염류 부하량이 변동(±50%)될 경우를 고려하였다. 또한, 기후변화에 따라 일사량(R)이 영양염류 부하량의 변동 폭과 같이 50%로 변화되는 사항은 현실성이 없다고 판단되어 일정 부분 변동(±5%)될 경우를 가정하였다.

설정된 시나리오에 따른 각 구성요소 증감 및 펄스 형태의 변화를 Fig. 3에 제시하였고, Fig. 2의 현재의 상태와 비교하였다. 첫째, 만약 R이 감소된다면, 생산자 및 소비자의 최대 값은 감소하면서 최소 값은 상대적으로 증가하여 그 증감 폭이 매우 감소되는 것으로 나타났다. 특히, 펄스의 주기가 길어지는 것으로 예측되었다. 영양염류 농도는 대량 25~30kgN/m^3 범위로 고농도를 유지하면서 증감 폭이 완만해지고 변화 주기가 길어지는 등 펄스가 약화되는 것으로 시뮬레이션되었다. 반대로, R이 증가됨에 따라 생산자와 소비자 및 영양염류의 최대 값은 감소하고, 최소 값은 증가하여 그 증감 폭

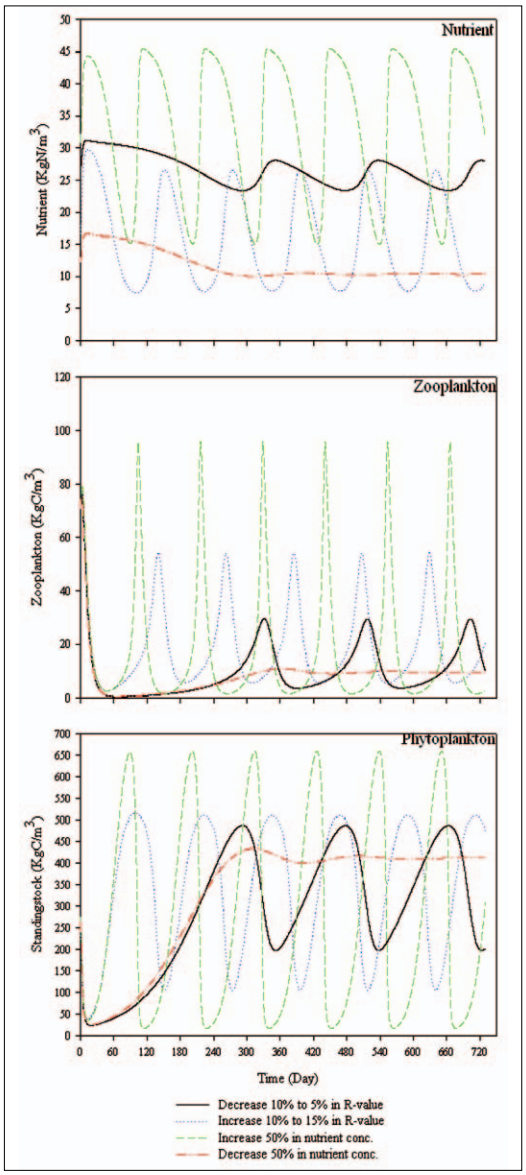

Fig. 3. Variations of nutrient, phytoplankton, and zooplankton for different simulation scenarios

이 현 상태에 비해 감소하지만, R이 감소되었을 경우에 비해 펄스의 진폭이 크게 나타났으며, 펄스의 주기는 다소 빨라지는 것으로 나타났다.

둘째, 영양염류 농도가 증가되어 그 부하량이 커진다면, 생산자의 최대 값은 증가하면서 최소 값은 감소하여 그 증감 폭이 현재에 비해 매우 커지는 것으로 나타났고, 소비자 또한 유사한 양상을 나타내었다. 영양염류의 농도도 크게 증가하면서 반복적인 증감 상황을 나타내었다. 특히, 펄스의 주기가 매우 빨라지는 것으로 예측되었다. 한편, 영양염류 부하량이 감소된다면, 시간이 지남에 따라 생산자와 소비자는 규칙적인 증감의 양상을 보이지 않고 최대 값보다 낮은 범위에서 일정한 농도를 유지하는 것으로 나타났고, 영양염류도 현재 보다 낮게 되어 일정한 농도를 지속적으로 유지하는 것으로 시뮬레이션되었다. 즉, 펄스의 소멸을 야기시키고 정상상태를 초래하는 것으로 시뮬레이션되었다.

일반적으로 영양염류가 낮을 때(빈영양단계)는 저성장과 종 다양성을 증가시키고, 반면 과잉영양단계에서는 개체의 성장속도가 더 커지고 다양성을 감소시킨다(Henrici, 1939; Margalef, 1958). Maximum power principle은 이러한 상태를 설명하는데, 즉, 영양염류가 과잉일 때, power(총생산)는 성장이 매우 빠른 종에 의해 최대가 되지만, 영양염류가 부족할 때는 높은 다양성을 유지하기 위해서 이용되는 과정에 의해 총생산이 결정된다. 안정적인 해양환경은 생물체에게 동질적인 환경을 제공하지만, 하구역 등에서 발견되는 시·공간적인 불균등성은 다양성을 높이는데 상대적으로 중요하다. 종 다양성이 풍부한 생태계가 더 안정하다고 한다면, 이러한 관점으로 볼 때, 댐 건설은 이러한 이질성과 종 다양성을 인위적으로 막을 수 있다는 점에서 생태계에 큰 영향을 미칠 수 있을 것이다.

이상의 결과를 살펴볼 때, 시나리오 설정에서 일사량의 변화 폭과 영양염류 부하량의 변화 폭이 달라서 정량적인 비교는 힘들지만, 두 가지 영향요소 모두 해역의 저차생태계에 상당한 영향을 줄 수 있는 것으로 나타났다. 특히, 영양염류 부하량의 증가는 펄스(frequency와 amplitude)의 강화를, 반대로 부하량의 급격한 감소는 펄스의 소멸을 초래하여 계절에 따른 농도의 변화없이 정상상태를 유지시키는 것으로 예측되었고, 이러한 정상상태의 유지는 해양환경의 순환에서 연쇄적인 영향을 초래할 가능성이 있을 것으로 판단된다. 물론, 대부분의 해양환경은 육상 등과의 지속적인 상호작용으로 오염부하량 등 그 변동 폭에 일정한 반응을 하거나 변화

패턴을 보여주고 있을 것이다. 그러나, 현재 그리고 장래에는 기후변화 및 인위적 개발에 따른 급격한 환경변화를 고려해야 하므로 이러한 시나리오에 따른 해양환경의 응답성 연구는 매우 필요해 질 것이다. 특히, 본 해역은 양쯔강의 담수부하에 따른 영양염류의 농도변화가 큰 지역이므로 산샤댐 건설과 이에 따른 방류량의 변화는 영양염류를 포함한 저차생태계의 물질 순환에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되며, 본 펄스 모델링 결과에서도 일정부분 확인되었다.

물론, 본 연구는 에너지시스템학적 차원에서 선행연구한 수질모델의 결과와 접목하는 차원에서 시도되어 영향인자 및 구성요소의 단순화가 이루어진 측면은 있지만, 향후 종합적이고 좀 더 정교한 모델링의 예비 진단 차원에서 의미있는 결과를 제공할 수 있을 것이다. 이러한 관점에서 본 연구해역에서의 해양환경 및 생태계에 대한 지속적인 관측으로 생태계모델을 위한 중요 데이터의 축적이 필요하고, 이를 바탕으로 좀 더 다양한 시나리오에 따른 환경변화 연구가 수행되어져야 할 것이다.

IV. 결 론

본 연구는 선행 연구한 공간격자상의 생태계모델과 에너지시스템 모델의 접목차원에서, 생태계모델에서 평가된 요인들을 에너지시스템 모델의 하나인 PULSE 모델에 연계시켜 그 중장기적인 변동을 시뮬레이션하였다. 즉, 생태계모델에 의해 도출된 영양염류, 식물플랑크톤과 동물플랑크톤 현존량 등의 값과 흐름을 에너지시스템 모델에 적용하여 장기적인 변동추이와 환경변화에 따른 펄스의 변화양상을 파악하였다.

첫째, 일사량이 감소된다면, 생산자 및 소비자의 현존량 증감 폭이 매우 감소되고 펄스의 주기가 길어지는 것으로 예측되었고, 영양염류 농도도 증감 폭이 완만해지고 변화 주기가 길어지는 등 펄스가 약화되는 것으로 시뮬레이션되었다. 반대로, 일사량이 증가됨에 따라 생산자와 소비자 및 영양염류의 증감 폭이 현 상태에 비해 감소하지만, 일사량이 감소되었을 경우에 비해 펄스의 진폭이 크게 나타났으며, 펄스의 주기는 다소 빨라지는 것으로 나타났다.

둘째, 영양염류 농도가 증가되어 그 부하량이 커진다면, 생산자의 증감 폭이 현재에 비해 매우 커지는 것으로 나타났고, 소비자 또한 유사한 양상을 나타내었다. 영양염류의 농도도 크게 증가하면서 반복적인 증감 상황을 나타내었다. 특히, 펄스의 주기가 매우 빨라지는 것으로 예측되었다. 한편, 영양염류 부하량이 감소된다면, 시간이 지남에 따라 생산자와 소비자의 현존량과 영양염류 농도는 규칙적인 증감의 양상을 보이지 않고 일정한 농도를 유지하는 것으로 나타났다. 즉, 펄스의 소멸을 야기시키고 정상상태를 초래하는 것으로 시뮬레이션되었다. 특히, 본 해역은 양쯔강의 담수부하에 따른 영양염류의 농도변화가 큰 지역이므로 산샤댐 건설과 이에 따른 방류량의 변화는 영양염류를 포함한 저차생태계의 물질 순환에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원(RP-2012-ME-025)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

강대석, 2010, 무인도서 선갑도의 에머지 환경수용력 평가, 한국해양환경공학회지, 13(1), 60-67.

오현택, 이석모, 이원찬, 정래홍, 홍석진, 김남국, Charles Tilburg, 2008, 시스템 생태학적 접근법에 의한 가막만 패류생산의 지속성 평가, 3. 가막만 패류 양식업의 에너지 모델링, 한국환경과학회지, 17(9), 969-980.

이대인, 2012, 황해 및 동중국해의 수질예측과 응답성 평가, 환경영향평가학회지, 21(3), 445-460.

Ascioti, F.A., Beltrami, E., Carroll, T.O. and

Wirick, C., 1993, Is there chaos in plankton dynamics? J. plank. Res., 15, 603-617.

Balch, W.M., 1981, An apparent lunar tidal cycle of phytoplankton blooming and community succession in the Gulf of Maine, J. exp. Mar. Biol. Ecol., 55, 65-77.

Berman, T., Stone, L., Yacobi, Y.Z., Kaplan, B., Schlichter, M., Nishri, A. and Pollingher, U., 1995, Primary production and phytoplankton in Lake Kinneret: A long-term record(1972-1993). Limonol. Oceanogr., 40, 1064-1076.

Caffrey, J.M., Chapin, T.P., Jannasch, H.W. and Haskins, J.C., 2007, High nutrient pulses, tidal mixing and biological response in a small California estuary: Variability in nutrient concentrations from decadal to hourly time scales, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 71, 368-380.

Freund, J.A., Mieruch, S., Scholze, B., Wiltshire, K. and Feudel, U., 2006, Bloom dynamics in a seasonally forced phytoplankton-zooplankton model: Trigger mechani는 and timing effects, Ecological complexity, 3, 129-139.

Henrici, A.T., 1939, Problems of lake biology, Am. Assoc. Adv. Sci. Symposium 10, 39-64.

Holligan, P.M., Pingree, R.D. and Mardell, G.T., 1985, Oceanic solitons, nutrient pulses and phytoplankton growth. Nature, 314, 348-350.

Kang, D.S., 1998, Pulsing and Self-Organization, Ph.D. dissertation, Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville, 283p.

Kent, R., Odum, H.T. and Scatena, F.N., 2000, Eutrophic overgrowth in the self-organization of tropical wetlands illustrated with a study of swine wastes in rainforest plots, Ecological Engineering, 16, 255-269.

Margalef, R., 1958, Temporal succession and spatial heterogeneity in phytoplankton, In: A.A. Buzzati-Traverso (ed.), Perspectives in marine biology, University of California Press, Berkeley, 323-349.

Odum, H.T., 1983, Systems Ecology, Wiley, New York, 644pp.

Odum, H.T. and Odum, E.C., 1994, Computer Minimodels and Simulation Exercises for Science and Social Sciences, To use with computer disks “BASIC Minimodels” for PC, Apple II and Macintosh, and Extend Energy Symbols Disk for Macintosh, Center for Environmental Policy, Univ. of Florida, Gainesville, 32611.

Odum, H.T. and Peterson, N., 1996, Simulation and evaluation with energy systems blocks, Ecological Modeling, 93, 155-173.

Odum, W.E., Odum, E.P. and Odum, H.T., 1995, Nature’s Pulsing Paradigm, Estuaries, 18, 547-555.

Yamamoto, T. and Hatta, G., 2004, Pulsed nutrient supply as a factor inducing phytoplankton diversity, Ecological Modeling, 171, 247-270.

최종원고채택 12. 05. 25