

연구논문

황해 및 동중국해의 수질예측과 응답성 평가

이대인

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

Water Quality Modeling and Response Assessment in the Yellow Sea and the East China Sea

Dae-In Lee

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

Abstract

In order to evaluate and predict the environmental impact of the low-trophic-level ecosystem to environmental changes in the Yellow Sea and the East China Sea, an ecological modelling study was undertaken. Simulation results of average distribution patterns and concentrations of water quality factors during the summer by the model were acceptable. Phytoplankton and remineralization rate of organic matter were very important parameters by a sensitivity analysis. Water quality factors showed high values in the estuary of the Yangtze River and in the West and South Sea of Korea and low values in the central area of the Yellow Sea. There is a plume of high values, especially nutrients, off the mouth of the Yangtze that expands or contracts with changes in the discharge strength. Characteristics of responses of water quality factors vary for different scenarios of environmental change, such as land-based pollution sources and atmospheric forcing. It is suggested that changes of light intensity, discharges of input sources, and wind play an important role in the marine ecosystem.

Keywords : Low-trophic-level ecosystem, Ecological modelling, Water quality, Yangtze River, Yellow Sea and the East China Sea

1. 서론

연안에서의 대규모 댐 건설과 매립 등 해역이용·개발활동에 따른 국지적인 환경변화와 더불어서 전 지구적인 기후변동에 따라서 해양은 직·간접적인 영향을 받고 있다. 이러한 환경변화는 대부분 인위적인 원인에서 기인되어 해양의 물리적, 생지화학적 과정에 영향을 주고, 때로는 오염현상의 가중을 포함한 해양 생태계의 반응이 매우 다양해질 것으로 예측되고 있다(Hare & Mantua, 2000; Oh, 2001; Park *et al.*, 1998; Venrick *et al.*, 1987). 따라서 해양의 지속가능한 이용과 효율적 관리를 위해서는 물질의 분포와 응답특성을 규명하고 정성적·정량적인 변화정도를 예측하는 것이 매우 중요하다. 이를 위한 도구로 수치모델이 이용되고 있다.

해양환경에서 특히, 유기물질과 무기물질 등 수질을 포함하는 생태계의 주요 요소에 대한 예측은 생태계모델에 의해 주로 이루어지고 있다. 이러한 생태계 모델은 공간적인 격자시스템에서 유체역학 모델에 의해 계산된 유동장에 생태계요인의 에너지와 물질순환 흐름을 수식화해서 결합하는 방법으로 물질의 시·공간인 분포를 모의하고 해석하는 방법이다(Takeoka & Murao, 1997; Yanagi *et al.*, 1997; Yuan *et al.*, 2007). 수질의 응답성은 해당 물질의 거동 특성과 환경변화를 유발시키는 외부요인의 영향에 따라 다르게 나타난다. 물질이 보존적이면 유체역학 모델만으로 이동과 확산을 어느 정도 예측할 수 있지만, 그 농도변화가 생지화학적 과정과 관련된다면 해수순환모델과 더불어 물질자체의 이동과 확산 모델이 연계되어야 한다. 주지하는 바와 같이, 생태계 요인 중에서 무생물적 요인(물리적 요인과 유기·무기물질)과 생물적 요인(생산자, 소비자, 분해자)을 모두 고려해서 정확하게 예측하고 평가하는 것은 매우 어렵다. 따라서, 대부분 생태계모델들은 연구 목적에 따라 일부 요인을 제외, 근사화, 상수화하거나 또는 특정 영양단계에 국한시켜 모델링하고 있다. 특히, 기초 생산자인 식물플랑크톤을 중심으로 먹이물질인 영양염류, 섭이자인 동물플랑크톤, 그리고 유기-무기태 요소로 이루어

진 저차생태계는 해양환경에서 매우 중요한 위치를 차지하며, 이에 대한 모델링은 수질모의와 환경관리 측면에서 매우 효율적이면서 해양환경의 기본적인 정보를 제공한다(Zuenko, 2007).

본 연구해역인 황해와 동중국해는 담수와 퇴적물 유입이 막대한 넓은 대륙붕으로 한·중·일간의 어업생산과 자원관리 측면에서 중요한 지역이다. 최근 적조발생과 부영양화를 포함한 수질오염이 빈발하여 해양환경에 악영향을 주고 있다(Mingjiang *et al.*, 2003). 특히, 영양염류를 포함한 물질 공급원에서 양쯔강이 가장 지배적인 역할을 하고 있고(Wang *et al.*, 2003), 흐름장과 수괴 분포 등은 매우 복잡하다(Zhang & Weng, 1996). 본 연구해역의 경계역인 대륙붕 지역은 쿠로시오해류가 물질수송에 지배적인 영향을 미치고 있고, 수심 200m에 유입된 오염물질은 대부분 쿠로시오에 의해 이동/확산되며, 수심 약 100m에 투입된 오염물질은 남해역 등에 약 5% 미만으로 약한 영향을 미치는 것으로 나타났다(KORDI, 1996).

이와 같이 본 연구해역은 장기적인 데이터 분석 결과, 환경변동 외부요인에 따라 해양 생태계의 변화 가능성이 매우 높고, 그에 따른 응답특성이 생태계 요소에 따라 그리고 공간적인 배경에 따라 차이를 나타내고 있다(Rebstock & Kang, 2003). 그러나, 이러한 해양 생태계에서의 수질이 향후 환경변화에 따라서 어떻게 정성적으로/정량적으로 응답을 할 것인가에 관한 연구접근과 저차생태계의 주요소의 장기적 변동에 관한 예측은 거의 이루어지지 않았다.

따라서 본 논문은 연구지역에서의 해수유동과 저염확산을 모의한 선행연구(Lee & Kim, 2007)를 바탕으로 격자시스템상에서 저차 생태계모델에 의해 연구지역에 있어서 오염물질인 COD(Chemical Oxygen Demand), DIN(Dissolved Inorganic Nitrogen), DIP(Dissolved Inorganic Phosphorus)와 기초생산자인 식물플랑크톤 생물량의 공간적인 분포양상을 재현하고, 다양한 환경변화에 따른 응답특성과 정성적·정량적인 변화량을 예측하였다.

II. 재료 및 방법

1. 적용 모델의 개요

본 연구에 적용한 생태-유체역학 모델(Eco-Hydrodynamic Model)에 대해서는 기존 연구(Taguchi & Nakata, 1998; Lee *et al.*, 2008) 등에 자세히 제시되어 있다. 해수유동모델에 의해 장기적이고 평균적인 흐름인 잔차류 결과를 계산하여 저차 생태계모델의 유동장으로 입력한 다음 생태계 요소를 예측한다. Fig. 1에 보는 바와 같이 유기태 요소로서 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 입자태 유기물질과 용존태 유기물질, 무기태 요소로서 용존 무기질소와 인, 그리고 수질요인으로 화학적산소요구량과 용존산소로 구성되며, 각 인자사이의 세부적인 에너지와 물질순환과정을 수식화해서 예측할 수 있다. 기온, 일사량, 바람 등과 같은 대기적 요인과 육상의 오염원도 중요한 외부 변수로 고려되고, 퇴적물과의 상호작용도 변수로 적용된다.

2. 모델영역, 입력인자와 시뮬레이션 방법

시뮬레이션을 위해서 선행연구의 해수유동모델에서 적용한 영역과 동일한 격자시스템을 적용하였다(Lee & Kim, 2007). Fig. 2에 육상 유입원의 위치(A) 및 수질모델의 검증에 위한 정점(A, B)을 나타내었다. 그림 A의 정점 1-51은 2001년, 2004~2006년에 남해, 황해 남부 및 동중국해에서 연구해역의 section을 구분하여 연도별로 실측조사한 지점이다(The Fisheries Science Institute, 2006). 한편, 그림 B의 A, B, C와 D라인에 대한 조사결과는 2005년 한·중 황해공동조사의 자료이다(KCJRG, 2006). 모델링을 위한 대표적인 입력인자와 각종 파라메타는 실측치와 문헌조사(Bowie *et al.*, 1985; Jorgensen, 1979)를 토대로 Table 1에 제시하였다. 시뮬레이션은 오염물질인 COD, DIN, DIP와 식물플랑크톤의 간접적인 현존량인 Chl. a를 대상으로 하였다. 물질의 수평 및 연직확산계수는 유동모델에 적용된 동일한 계수값을 사용하여

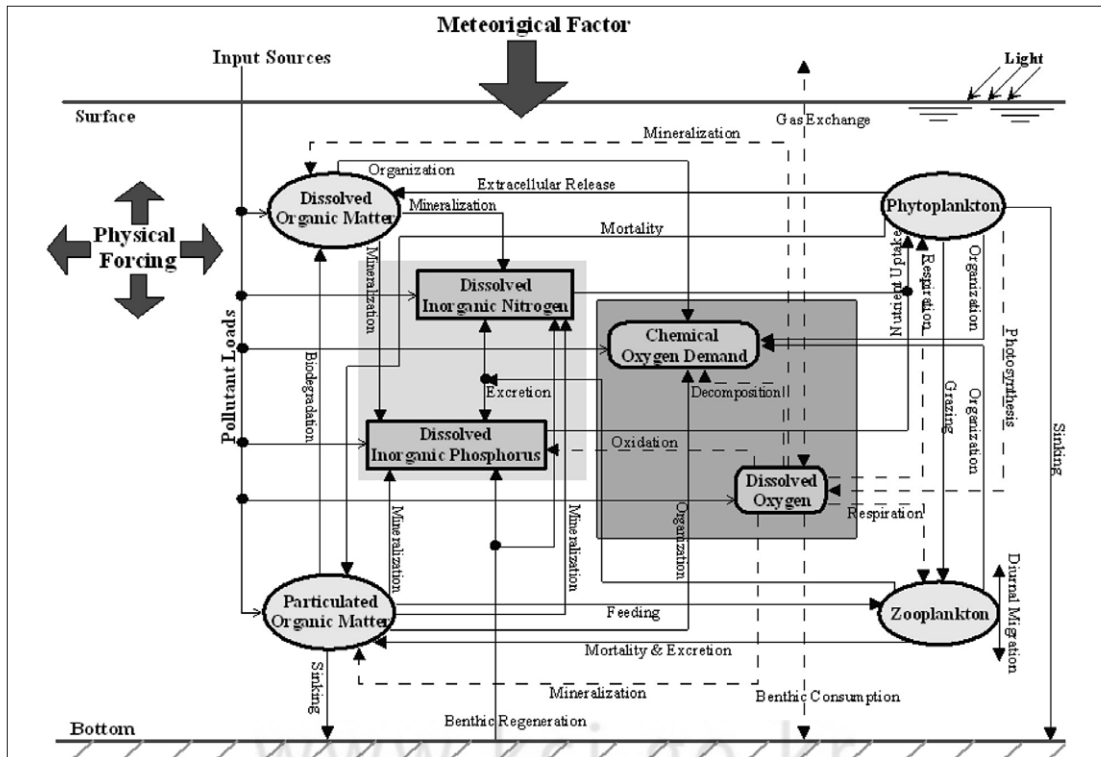


Fig. 1. The Biogeochemical cycles in the lower trophic marine ecosystem of the ecological model

Table 1. Definition and input values of biogeochemical parameters used in the ecological model

Parameters			Input values	
Total simulation time			200 days	
Simulation time interval			1,800 sec	
Initial values for compartments	DO(mg/L)	8.0-8.5	POC(mgC/m ³)	200.0
	COD(mg/L)	1.5-2.0	DOC(mgC/m ³)	3,000.0
	DIP(μM)	0.01-0.2	PHYTO(mgC/m ³)	2.0-48.0
	DIN(μM)	1.2-1.5	ZOO(mgC/m ³)	20.0
Boundary values for compartments	DO(mg/L)	8.0-8.5	POC(mgC/m ³)	100.0
	COD(mg/L)	1.0	DOC(mgC/m ³)	1,000.0
	DIP(μM)	0.01	PHYTO(mgC/m ³)	2.0-20.0
	DIN(μM)	0.1	ZOO(mgC/m ³)	5.0
Horizontal viscosity and diffusion coefficient			Level 1-5: 1.0E7(cm ² /s)	
Major atmospheric conditions			Maximum light intensity: 632.1 cal/cm ² /day Length of day: 0.5 day	
Major biological parameters	Maximum growth rate of phytoplankton at 0°C: 0.95 day ⁻¹ Respiration rate of phytoplankton at 0°C: 0.01 day ⁻¹ Maximum grazing rate of zooplankton at 0°C: 0.18 day ⁻¹ Death rate of phytoplankton at 0°C: 0.03 day ⁻¹ Natural death rate of zooplankton at 0°C: 0.05 day ⁻¹ Mineralization rate of POC at 0°C: 0.01 day ⁻¹ Mineralization rate of DOC at 0°C: 0.003 day ⁻¹ Half saturation constant for uptake of PO ₄ ³⁻ at 0°C: 0.001 μM Half saturation constant for uptake of DIN at 0°C: 0.150 μM Ivlev index of zooplankton grazing: 0.01(mgC/m ³) ⁻¹ Digestion efficiency of zooplankton: 70% Total growth efficiency of zooplankton: 30% Settling velocity of phytoplankton: 0.35 m/day Settling velocity of detritus: 1.1 m/day Maximum downward velocity in the daytime for diurnal perpendicular motion of zoo plankton: 18.144 m/day Reaeration coefficient at sea surface: 0.25 day ⁻¹ Ratio of P/C for phytoplankton: 1.750E ⁻⁴ Ratio of N/C for phytoplankton: 2.580E ⁻³ Ratio of COD/C for phytoplankton: 1.137E ⁻⁴ Ratio of P/C for zooplankton: 7.040E ⁻⁴ Ratio of N/C for zooplankton: 1.320E ⁻² Ratio of COD/C for zooplankton: 1.170E ⁻⁴ Ratio of P/C for POC: 1.000E ⁻⁶ Ratio of N/C for POC: 5.000E ⁻⁴ Ratio of COD/C for POC: 0.900E ⁻³ Ratio of P/C for DOC: 1.000E ⁻⁶ Ratio of N/C for DOC: 3.500E ⁻⁴ Ratio of COD/C for DOC: 0.900E ⁻³ Chl. a/C: 0.018 Nutrient fluxes from sediment, NH ₄ ⁺ : 24.0 mg/m ² /d, PO ₄ ³⁻ : 9.0 mg/m ² /d			

다. 모델영역내로 유입되는 육상부하원의 유량 및 수질자료 등은 Table 2와 같이 한반도와 중국대륙 등의 주요 강과 하천을 토대로 문헌조사를 통해 획득한 자료를 최대한 이용하여 총 33개를 고려하였

다(김, 1995; Lee *et al.*, 2007). 비점오염부하는 현 단계에서는 고려하지 않았다.

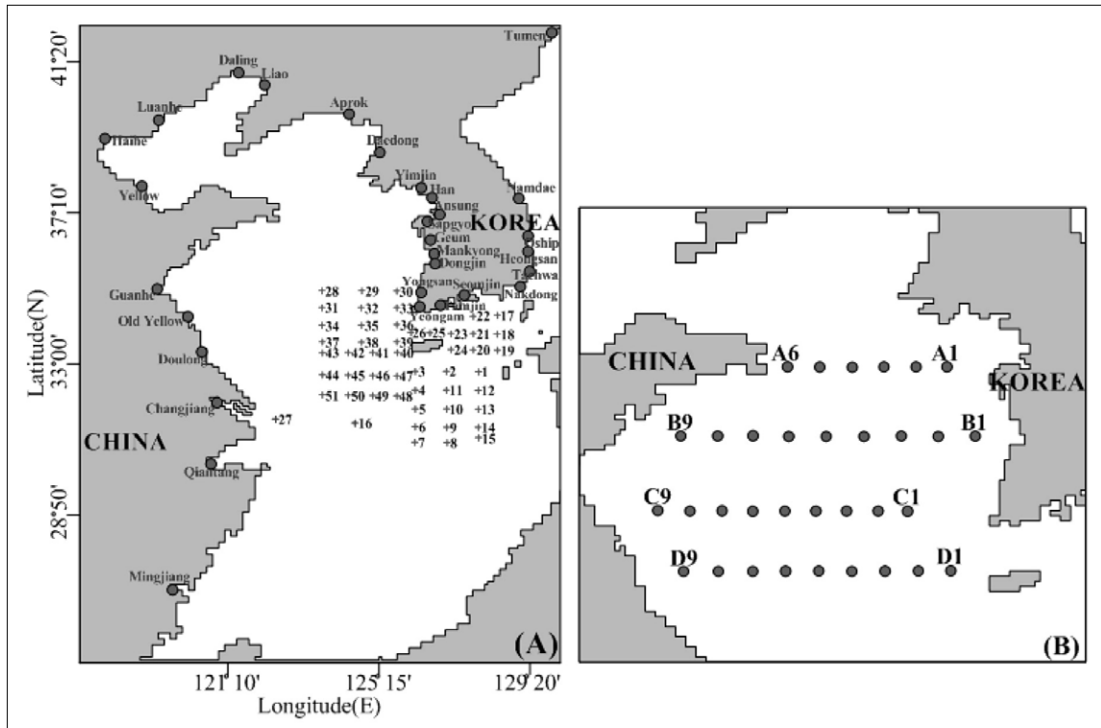


Fig. 2. Modeling area, point sources, and verification stations for ecological modeling

III. 결과 및 고찰

1. 모델의 검증 및 민감도 분석

본 생태계모델의 물리적 이류와 확산과 관계되는 유동장은 조석잔차류, 침송류와 밀도류의 합으로 구성되는 잔차류로서 해수유동모델에 의해 계산되었는데, 그 검증 및 결과에 관한 내용은 선행연구에 제시되었다(Lee & Kim, 2007). 특히, 양쯔강의 담수유입량 변동에 따라서 염분전선의 형성과 저염수의 확산이 매우 민감하게 반응하였고, 이러한 결과는 담수에 의한 물질 공급이 매우 중요한 유입원이라는 것을 뒷받침 해주었다.

잔차류를 유동장으로 입력한 후 생태계모델의 각종 입력인자 및 파라메타를 조절해 가면서 대상해역의 수질상황을 잘 재현하도록 보정과정을 실시하였다. 본 모델은 한 시점 또는 특정 기간의 평균적인 해양환경을 시뮬레이션하고 해석하는데 초점을 두고 있고, 그 시간적인 배경은 일반적으로 육상 유

입원의 유량, 오염부하량과 바람 조건 등을 고려해서 수질이 가장 악화될 수 있는 하계상황을 고려하였다. 또한, 환경변화에 가장 민감하게 반응하는 표층을 초점으로 모의하였다.

본 연구해역은 기 연구된 내만이나 연안에 비해 수심과 넓이의 규모가 매우 크기 때문에, 동일시간대에 광범위한 수평적-수직적 공간을 실측조사하는 것이 매우 힘들고 그리고 수행된 자료 또한 부족하다. 가능한 많은 데이터를 이용해서 충분한 검증이 필요하지만, 실측자료와 이용될 수 있는 자료의 제한이 있었고, 향후 이러한 부분에 대해서는 지속적인 체계적인 조사연구를 통한 자료의 누적이 필요하다고 판단되었다. 이러한 점을 감안하여, 본 연구는 우선 Fig. 2에 제시된 연도별로 연구해역의 공간적 영역을 구분하여 실측한 표층 자료와 예측한 COD, DIN, DIP와 Chl. a 값을 비교해서 모델을 검증하였다.

연구해역에서 2001, 2004~2006년의 조사정점별로 검증된 COD, DIN, DIP와 Chl. a의 결정계수

Table 2. Terrestrial pollutant loads from point sources flowing into the model region

Point Sources	Pollutant Loads(ton/day)					
	COD	DO	DIP	DIN	POC	DOC
Han	548.5	822.8	5.5	274.3	329.1	658.2
Yimjin	139.0	370.6	1.4	69.5	92.7	231.7
Ansung	51.1	76.7	0.5	25.6	30.7	61.3
Sapgyo	10.5	15.8	0.1	5.3	6.3	12.6
Geum	172.8	323.9	1.7	86.4	129.6	259.1
Mankyong	10.5	19.6	0.1	5.2	7.9	15.7
Dongjin	12.2	22.8	0.1	6.1	9.1	18.3
Yongsan	53.5	100.3	0.5	26.7	40.1	80.2
Yeongam	52.0	97.5	0.5	26.0	39.0	78.0
Tamjin	11.4	21.4	0.1	5.7	8.6	17.1
Seomjin	177.9	333.6	1.8	89.0	133.4	266.9
Nakdong	270.3	405.5	2.7	135.2	162.2	324.4
Taehwa	11.0	16.4	0.1	5.5	6.6	13.1
Heongsan	141.3	212.0	1.4	70.7	84.8	169.6
Oship	9.6	10.2	0.1	3.4	4.1	8.2
Namdae	7.0	7.5	0.0	2.5	3.0	6.0
Daedong	122.5	326.6	1.2	61.2	81.6	204.1
Aprok	311.1	829.6	3.1	155.6	207.4	518.5
Liao	116.6	272.2	0.8	77.8	116.6	233.3
Daling	8.2	19.2	0.1	5.5	8.2	16.4
Luanhe	49.3	114.9	0.3	32.8	49.3	98.5
Haihe	233.3	544.3	1.6	155.5	233.3	466.6
Yellow	344.7	804.3	2.3	229.8	344.7	689.4
Guanhe	189.0	441.0	1.3	126.0	189.0	378.0
Old Yellow	285.1	665.3	1.9	190.1	285.1	570.2
Doulong	189.0	441.0	1.3	126.0	189.0	378.0
Changjiang	33,000.0	30,464.0	435.2	8,704.0	13,056.0	26,112.0
Qiantang	384.6	897.4	2.6	256.4	384.6	769.2
Mingjiang	480.0	1120.0	3.2	320.0	480.0	960.0
Tumen	2,160.0	3,240.0	21.6	1,080.0	1,296.0	2,592.0

와 정점별 분포의 차이를 Fig. 3에 제시하였다. COD는 각각 0.7727, 0.9424, 0.0153과 0.7028로서 2004년 조사에서 가장 큰 기여율을, 2005년도에 가장 낮은 값을 나타내었다. 전체적인 결정계수는 0.7710으로 나타나서 양호한 범위를 보였다. 특히, 남해안 근역 공간에서 조사한 2004년의 결과는 0.9 이상의 매우 좋은 재현성을 나타내었다. 반면에서해 남동부에서 실측한 자료는 낮은 재현성을 보여주고, 동중국해의 정점들에서는 0.7이상의 양호한 상관성을 나타내었다. DIN의 전체적인 결정

계수는 0.9903으로 매우 높게 나타났는데, 이것은 2004년에서 보인 0.9979의 매우 양호한 결과 때문인 것으로 판단되었다. 즉, 2004년에는 최소치와 최대치에 이르는 분포형태가 매우 재현성이 있는 것으로 계산되었다. 2001년에는 0.4720, 2005년에는 0.8126, 그리고 2006년에는 0.1324로 나타나서 시기별/공간별로 큰 변동을 보였다. DIP는 2001년도는 0.0400으로 매우 낮았고, 2004년에는 0.8858로 가장 높았고, 2005년과 2006년은 각각 0.6659와 0.1272로 나타났고, 전체적으로는

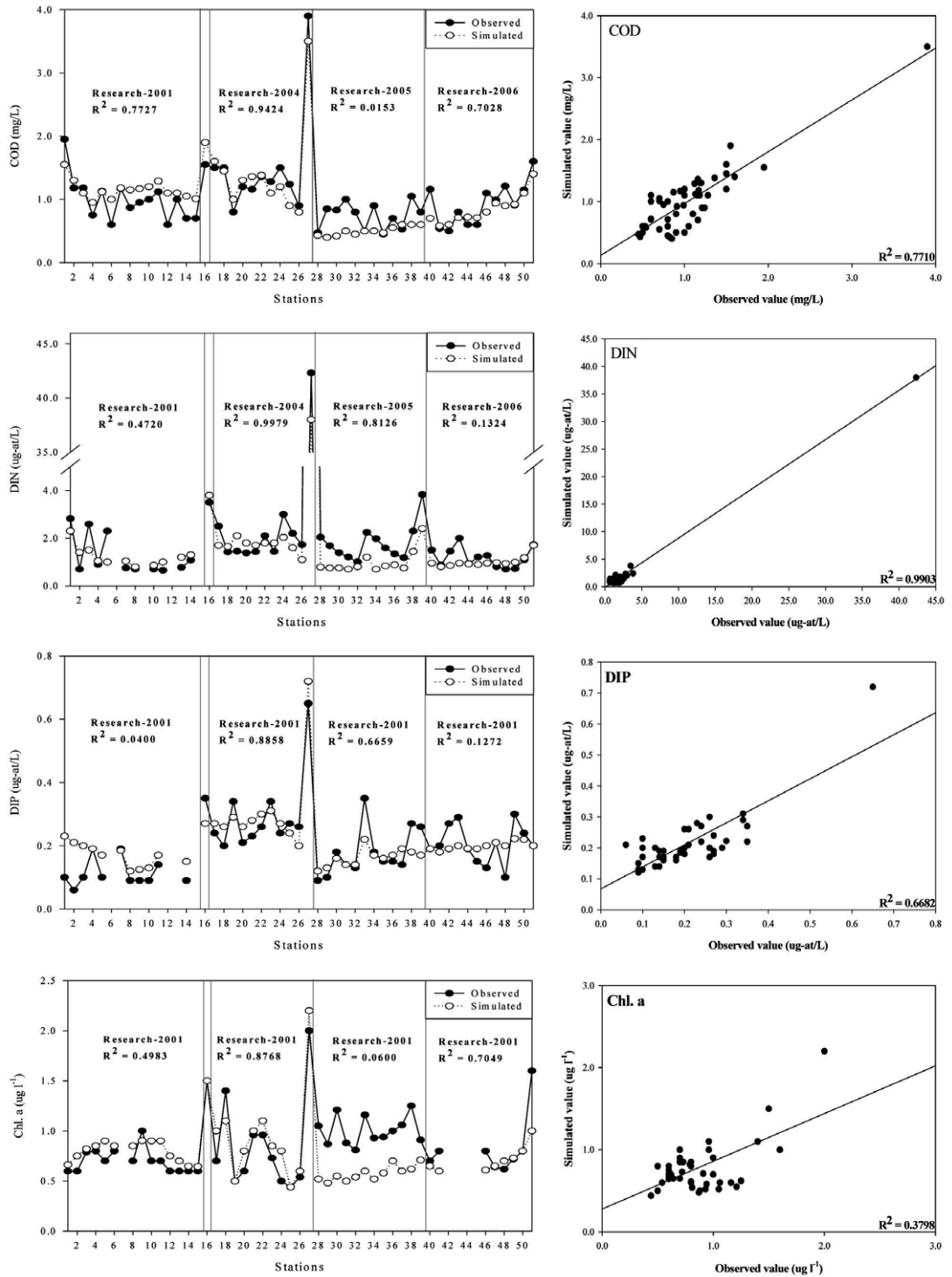


Fig. 3. Comparison of simulated results with observed COD, DIN, DIP and Chl. a values at surface level in the South Sea of Korea and the East China Sea

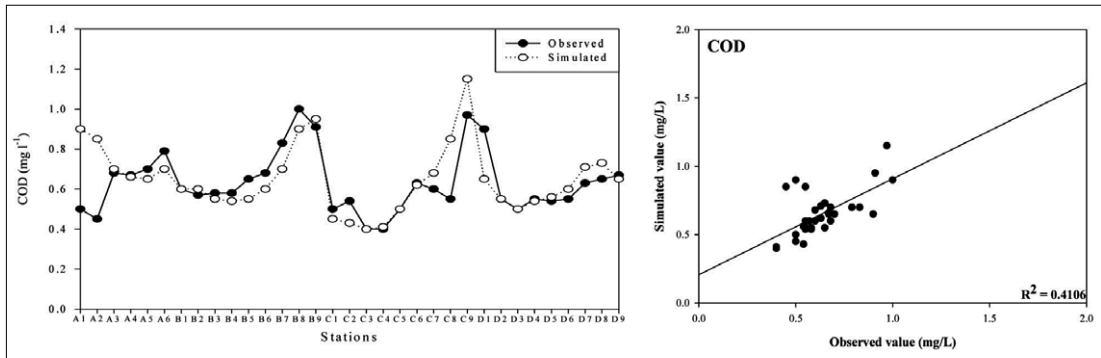


Fig. 4. Comparison of simulated results with observed COD values at surface level in the Yellow Sea

Table 3. Sensitivity analysis for the reaction coefficient in the ecological model: We changed the set concentration value of the parameter that had the largest effect by 100% and calculated the effect on the other coefficients in terms of a saturation percentage

Major Coefficients	COD	Chl. a	DIN	DIP
Maximum growth rate of phytoplankton at 0°C	18.8	4.1	25.3	27.1
Respiration rate of phytoplankton at 0°C	39.7	38.2	42.6	42.4
Death rate of phytoplankton at 0°C	87.1	100.0	100.0	100.0
Settling velocity of phytoplankton	17.1	14.4	12.4	11.8
Maximum grazing rate of zooplankton at 0°C	7.7	4.6	7.5	6.4
Natural death rate of zooplankton at 0°C	4.7	6.6	1.6	2.5
Mineralization rate of POC at 0°C	18.0	2.2	0.9	2.0
Mineralization rate of DOC at 0°C	83.3	7.1	2.2	6.9
Half saturation constant for uptake of PO ₄ ³⁻ at 0°C	4.6	2.7	0.5	1.5
Half saturation constant for uptake of DIN at 0°C	25.9	19.4	25.7	25.1
Ratio of Chl. a/C for phytoplankton	26.1	27.2	31.5	32.0
Ratio of N/C for phytoplankton	43.7	55.0	10.9	52.7
Ratio of P/C for phytoplankton	16.4	16.4	19.3	74.9
Ratio of COD/C for DOC	100.0	0.0	0.0	0.0
Ratio of N/C for DOC	11.0	16.4	7.9	13.3
Ratio of N/C for POC	3.5	5.6	2.7	4.4

0.6682의 값을 보여주었다. Chl. a는 각각 0.4983, 0.8768, 0.0600 그리고 0.7049 범위로 2004년도에 가장 높았고, 2005년에 가장 낮은 값을 보여주었고, 전체적으로는 0.3798범위를 나타내었다.

총괄하면, 모든 수질인자 예측에서 2004년도의 조사공간에서 가장 큰 재현성을 나타내었고, 그 외의 공간에서는 수질인자마다 다소의 변동을 나타내었지만 대체적으로 2001년과 2006년도에 양호한 상관성을 그리고 2005년도는 영양염류의 재현성은 양호하였지만, COD와 Chl. a는 낮은 재현성을 나타내었다. 또한, 황해 중앙부 주변해역에서 COD에

대해서 검증된 결정계수는 약 0.4106으로, 일부 지점에서 특히, A1, A2, C8과 C9 정점에서 상대적으로 큰 오차를 유발한 것을 제외하고는 전체적인 패턴이 매우 유사하였고 정점별 상대오차는 작았다 (Fig. 4).

결정계수의 감소와 오차는 다양한 원인에서 기인될 수 있는데, 기본적으로 물리적인 이유와 확산 값과 관계되는 유동장의 오차에서 기인될 수 있고, 그리고 수질 예측모델의 초기치, 경계치 등 입력인자와 다른 생화학적 계수의 부정확성에 의해 기인될 수 있다. 또한, 본 연구와 같이 격자시스템의 범위

가 매우 클 경우 실측지점과 그것에 해당되는 격자 지점 사이에서 오는 오차도 중요한 원인이다. 자연 현상을 100% 예측한다는 것은 거의 불가능하므로 모델링의 보정/검증과정을 거쳐 나온 결과를 해석할 때는 그것에 포함된 오차 등을 염두해 두어야 할 것이다. 하나의 수질인자를 재현하는 것은 매우 쉬울 수 있으나, 몇 개의 수질인자를 동시에 만족하기 위해서는 상대적으로 매우 어려운 측면이 있다. 왜냐하면 수질인자에 관여하는 계수의 민감도와 서로 다르기 때문에 하나의 수질인자를 맞추기 위해서 최적값으로 보정하면 다른 인자가 차이가 있을 수 있기 때문이다. 또한 앞서 지적했듯이, 연구해역의 범위가 매우 넓기 때문에 실측 데이터의 시간과 공간적인 차이에서 오는 문제를 고려할 수 있을 것이다. 즉, 시뮬레이션 한 값은 특정시기의 공간적인 범위에서 나타나는 수질을 동시에 재현하지만, 실측값은 자료확보와 관측이 동시에 이루어지지 않았기에 당연히 특정 공간에서 시뮬레이션 결과와 다소의 차이를 보일 수 있을 것이다. 이러한 점을 감안하여 볼 때, 본 모델의 결과는 시·공간적으로 환경변화가 심한 하계의 수질상황에 대해서 어느 정도의 오차를 인정하더라도 평균적인 분포패턴과 농도를 유사하게 재현하는 것으로 판단되었다. 물론, 향후 이에 대한 좀 더 정확한 자료를 바탕으로 연구해역의 예측시스템을 향상시켜야 할 것으로 사료된다.

본 생태계모델에 적용된 각종 계수가 COD, DIN, DIP와 Chl. a의 계산결과에 어떤 계수가 어느 정도 영향을 미치는가를 파악하기 위해서 연구해역의 황해, 제주도 인근, 동중국해에 해당하는 대표 격자점을 대상으로 민감도 분석을 실시하였다. 모델 보정과 검증과정에서 적용된 각 계수의 기준값(default)과 그 값을 $\pm 100\%$ 증감시켰을 때 각 수질인자에 가장 큰 영향을 준 계수의 농도값(위 세 지점의 평균)을 100으로 하고 다른 계수의 영향정도를 포화백분율로 나타낸 결과를 Table 3에 제시하였다.

COD 현존량에 가장 큰 영향을 주는 계수는 DOC(Dissolved Organic Carbon)의 COD/C 비

로 나타났고, 식물플랑크톤 사망속도, DOC 무기화 속도, 식물플랑크톤의 N/C비, 식물플랑크톤의 호흡속도 순으로 나타나서 DOC와 식물플랑크톤 관련 계수가 중요한 영향을 미치는 것으로 시뮬레이션되었다. Chl. a는 식물플랑크톤 사망속도, 식물플랑크톤의 N/C비, 식물플랑크톤 호흡속도, 식물플랑크톤의 Chl. a/C비 순으로 나타났고, DIN은 식물플랑크톤 사망속도, 식물플랑크톤 호흡속도, 식물플랑크톤의 Chl. a/C비, DIN 반포화상수와 식물플랑크톤 최대성장속도 순으로 영향을 끼쳤고, 그리고 DIP는 식물플랑크톤 사망속도, 식물플랑크톤의 P/C비, 식물플랑크톤의 N/C비, 식물플랑크톤의 Chl. a/C비, 식물플랑크톤 최대성장속도 순으로 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이와 같이 식물플랑크톤과 관계된 계수가 가장 큰 민감성을 나타내었고, 그 중에서 식물플랑크톤 사망속도가 가장 크게 나타났다. 이러한 결과는 본 모델의 보정과 검증과정에서 조절된 계수와 해양환경 및 다른 초기치와 입력인자와 상관성에 의해 나타난 결과이므로 다른 모델링 연구시에는 그 결과가 달라질 수 있다는 것을 주지해야 한다. 이와 같이 향후 본 연구지역에서 생태계 예측과 신뢰도 향상을 위해서는 식물플랑크톤과 유기물의 무기화속도에 관계한 인자에 관해서 좀 더 향상된 연구와 데이터 확보가 있어야 할 것이다.

2. 수질 및 식물플랑크톤 현존량 모의

생태계모델의 적용 검증 후 연구해역의 하계 평균적인 상태의 수질환경(COD, DIN, DIP와 Chl. a)을 모의한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. COD는 BOD(생화학적 산소요구량)의 대체수단으로 수중 산소를 소비하는 유기물질 함량의 간접지표로 이용되며, 해역에서는 육상에서의 하/폐수에 의한 유입과 영양염 섭취로 인한 해역 자체의 식물플랑크톤의 성장 등에 기인되어 고농도를 나타낼 수 있다. 한편, 영양염류는 부영양화 또는 적조현상과 관련되는 식물플랑크톤의 성장에 주로 관련되며, 제한인자로는 무기질소와 인을 많이 고려하고 있다. 이러한 질소

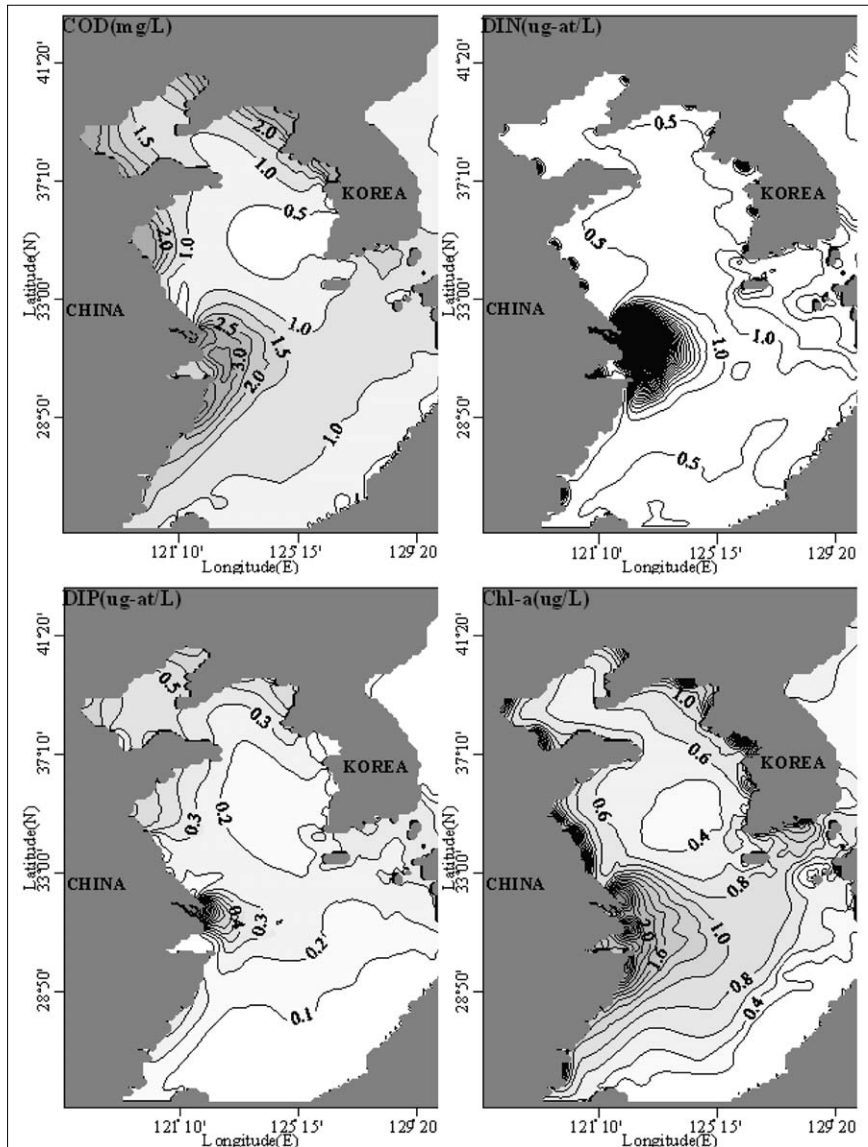


Fig. 5. Simulation results of surface COD, DIN, DIP and Chl. a values in the study area in summer

와 인은 육상에서 하/폐수 등에 의해 유입될 수 있고, 또한 오염된 퇴적물에서 용출될 수 있다.

COD는 동중국해 개방경계역과 대륙붕지역에서는 1.0 mg/L 이하의 분포를 보였고, 북쪽으로 올라갈수록 점차 증가하는 양상을 보였다. 양쯔강 하구역에서는 4.0 mg/L 이상의 고농도를 보이면서 외해쪽으로 갈수록 점차 낮아지는 양상을 나타내었다. 남해와 서해안, 발해만 등 육역 인접에서는 상대적으로 고농도를 나타내었지만, 황해 중앙역과 한

국 남서해역에서는 약 0.5 mg/L 이하의 상대적인 저농도 분포를 나타내었다. 또한, 점차 중국연안으로 갈수록 높아지는 양상을 나타내었다. KCJRG (2006)은 황해에서 10-11월에 조사한 결과, 표층 COD는 0.38-1.02 mg/L 범위, 평균 0.63 mg/L로 황해중앙부에서 낮고 양국 연안지역에서 높다고 보고하였다. 특히, COD의 분포에는 육역으로부터의 유기물의 부하에 의한 영향보다는 영양염류 공급에 의한 플랑크톤 생체량 증가에 의한 자생적

인 기여가 더 큰 것으로 평가되었다.

DIN은 양쯔강 하구역에서 40 μM 이상의 매우 급격한 농도증가와 표층 전선형성을 보여주었고, plume에서 벗어날수록 감소하는 양상을 보였는데, 이러한 분포양상은 Wang *et al.*(2003)과 매우 유사하였다. 제주도 남쪽해역과 남해 연안 등은 대륙붕 경계역에 비해 상대적으로 다소 높은 농도를 나타내었다. 이러한 분포는 양쯔강 유출량에 의한 저염수 확산패턴(Lee & Kim, 2007)과 매우 유사하여 담수유입의 영향을 직접적으로 보여주었다. DIP는 대륙붕 근역에서 0.1 μM 로 북쪽으로 갈수록 점차 증가하고, 양쯔강 하구역에서 0.3 μM 이상의 급격한 농도증가가 나타났다. 인은 본 연구해역에서 제한인자로서 특히, 양쯔강 하구역에서는 N:P비가 매우 커서 인이 상대적으로 매우 제한요소로 작용하고 있는 것으로 평가된다(Wang *et al.*, 2003). 황해 중앙역에서는 0.2 μM 이하의 상대적으로 낮은 분포가 예측되었다.

Chl. a는 동중국해 대륙붕에서 약 0.4 $\mu\text{g/L}$ 이하를 보였고, 점차 황해 및 남해로 갈수록 증가하였는데, 양쯔강 하구역에서 2.0 $\mu\text{g/L}$ 이상의 고농도를 나타내었고, 그 확산 영향이 뚜렷하게 예측되었다. 남해에서도 0.8 $\mu\text{g/L}$ 이상의 농도를 보였지만, 황해 중앙역에서 영양염류의 분포와 유사하게 낮은 분포양상을 나타내었다. 이러한 분포양상은 KCJRG(2006)의 실측결과와 매우 유사하였다. 특히, 양쯔강 하구역, 남해안과 서해안, 그리고 중국 동해안 등에서 상대적으로 농도가 높았고, 적조 발생역과 거의 일치하였다.

수질 환경적 입장에서, Lin *et al.*(2005)은 수십 년간의 데이터 분석에서 수온, 염분, DIN과 N:P비는 증가추세를, 그리고 DO, 인과 규소는 감소경향을 보여주었고, 물리/화학적 요인의 변화에 따라서 황해의 영양염제한, 일차생산의 감소, 식물플랑크톤 우점종의 변화와 어군과 종다양성의 변화를 보고하였다. 황해와 동중국해에 있어서 하천에 의한 영양염류 공급은 지배적인 유입원이고, 이와 함께 연안에서 멀리 떨어진 해역에서는 대기 침적을 통

한 공급량도 매우 중요한 것으로 평가되고 있다(Zhang *et al.*, 2007). Zhang(1994)은 황해에서 대기 침적을 통한 DIN과 DIP량은 각각 총량의 약 65%와 70%를 차지할 가능성을 제시하였다.

전체적으로 모든 수질요소가 양쯔강 하구역에서 가장 큰 농도변화와 현존량을, 그리고 중국 동해안, 한반도 서해안과 남해안 등에서도 고농도를 보였고, 황해 중앙역에서는 다소 감소되는 패턴을 나타내었다. 대륙붕 이하역에서는 상대적으로 저농도가 시뮬레이션되었다. 해수유동모델에 의한 염분확산과 잔차류 모의 결과에서 나타났듯이 본 연구해역에서는 양쯔강의 유출량이 물질의 정성적/정량적 분포에 큰 기여를 하는 것으로 판단되었고, 그 세기에 따라 물질의 분포가 확장/축소되는데, 특히, 영양염류가 매우 큰 응답특성을 보이는 것으로 나타났다. 여름철 양쯔강으로부터 유출된 저염수는 황해남부 뿐만 아니라 남해연안까지 영향을 미치는 것으로 알려졌다. 이와 같이 양쯔강이 물질 공급원 측면에서 저차생태계에 매우 중요한 요인이므로 이에 대한 체계적인 모니터링과 연구가 필요하다고 판단되었다.

3. 환경변화에 따른 수질 응답성과 예측

본 연구해역에서는 댐 건설, 매립, 육상 오염원의 배출특성 변화 등 국지적인 환경변화와 지구온난화와 관련된 기온, 수온, 일사량과 강수량 등의 변화를 포함하는 지구규모의 환경변화가 동시에 일어나고 있고, 이에 따른 해양환경의 변화가 수반되고 있다. 따라서 이러한 변화에 응답해서 결과적으로 나타나는 해양생태계의 변동양상을 예측하고 정성·정량적으로 평가하는 것은 중요하다. 본 연구에서는 향후 연구대상해역에서 기대되는 다양한 환경변화 요인 중 그 중요성과 본 모델에 적용가능성 등을 고려하여 환경변화의 요인으로 고려하였다(Table 4).

첫 번째 요인으로 유입원의 수질개선과 악화, 수처리시설의 증감과 관련한 유입수질의 농도 변화를 고려하였다(시나리오 1). 두 번째 요인으로 유입원의 유량변동을 고려하였는데, 이것은 방조제 건설 등에

Table 4. Simulation scenarios of environmental changes considered this ecological model

Forcing of environmental changes		Related factor with forcing	Changing rate of forcing to default	Scenario
Variation of pollutant loads from input sources	input concentration of pollutants	Number and water quality of input sources Water treatment facilities	$\pm 50\%$	Scenario 1
	Discharge rate	Construction of dyke Global warming-Rain fall	$\pm 50\%$	Scenario 2
Variation of light intensity		Global warming Atmospheric turbidity	$\pm 50\%$	Scenario 3
Variation of wind speed		Air-water temperature	$\pm 50\%$	Scenario 4
No input sources		No discharge from input sources	-	Scenario 5

의한 요인과 지구온난화-기온변화와 관련된 강수량 변화와 관련이 깊다(시나리오 2). 세 번째는 일사량 변동을 고려했고(시나리오 3), 네 번째는 하계 탁월 풍인 남풍계열의 속도변화를 고려하였다(시나리오 4). 다섯 번째는 가장 극단적으로 유입원에서 배출되는 양이 매우 적어서 이것을 무시했을 때의 상황을 고려하였다(시나리오 5). 기온, 수온의 변화에 따라서 해류의 변화와 직접적인 대기침적의 영향도 매우 중요한 요인이지만, 현 연구단계에서는 모델 입력의 적용성 등의 문제 등으로 고려하지 않았지만, 향후 이러한 요인도 고려해야 할 것이다. 한편, 연구해역이 매우 넓기 때문에 응답결과가 공간적으로 차이가 날 수 있다. 이러한 점을 고려하여 크게 6개의 비교정점에서 예측된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. A는 발해만 중앙, B는 황해 중앙, C는 남해 인접, D는 제주도 인접, E는 양쯔강 하구, F는 양쯔강 하구와 제주도 사이의 격자점을 고려하였다.

현 환경조건하에서 만약 시나리오 1일 경우에 COD는 E지점에서 기준값 보다 약 2.1 mg/L(61%) 변동으로 가장 크게 반응했고, F는 약 22%, A와 C는 약 5-10%, 그리고 D는 1% 미만으로 가장 낮게 평가되었다. Chl. a는 F지점에서 0.24 $\mu\text{g/L}$ (25%)로 최대 변동을, C에서 약 11%, 나머지 지점에서는 3% 미만의 변동을 보였다. DIN은 E에서 약 48.5 μM (111%), F에서 57%의 급격한 변동을 보였다. A, B와 D에서는 상대적으로 매우 작은 응답성을 나타내었다. DIP 역시 E지점에서 106%의 변동을, D에서는 1% 미만, 나머지지점에서는 약 3-10% 정도의 변동이 나타났다.

시나리오 2하에서는, COD는 F에서 약 28%, E에서 약 13% 변동으로 다른 지점보다 높았고, Chl. a는 E에서 약 44%, F에서 29%, C에서 11%의 변동을 보였고, 나머지는 변동이 거의 없었다. DIN과 DIP 역시 E, F, C 순으로 다른 지점보다 매우 민감한 반응특성을 나타내었다. E지점에서 COD, DIN과 DIP는 시나리오 1이 더 큰 영향을, Chl. a는 시나리오 2가 더 큰 영향을 미쳤다. F지점에서는 모든 항목에서 시나리오 2가 더 큰 영향을 미치는 것으로 예측되었다. 나머지 정점에서는 거의 유사한 변동 값을 나타내었다.

시나리오 3은 모든 수질항목에서 그리고 대부분 정점에서 다른 시나리오 보다 매우 큰 응답특성을 보여주었다. COD는 B와 F에서 95% 이상의 변동을, 나머지 지점에서는 약 10-70% 정도의 변동을 나타내었고, Chl. a는 39%-127% 범위로 D, E, B, F 순으로 큰 반응성을 나타내었다. 특히, DIN은 17-866% 범위로 모든 시나리오 조건하에서 가장 큰 응답성을 나타내었는데, E에서 변동 농도폭은 7.6 ?M로 가장 크지만, 기준 농도자체가 매우 높기 때문에 변동률은 17%로 낮게 나타났다. A지점에서는 866%로 최대, F지점에서는 453%, C와 B에서는 360-390% 범위를 나타내었다. DIP는 52-147% 범위로 E에서 최소, F에서 최대를 나타내었고, B와 C에서는 약 120%의 변동률을 보였다. 그러나, 시나리오에서 고려한 일사량 변동 폭은 현실적으로 크게 기대할 수 없음을 고려해야 할 것이다.

시나리오 4에서는 COD는 F와 C에서 각각 약 60%와 27%로 크게 반응했고, Chl. a는 F에서 약

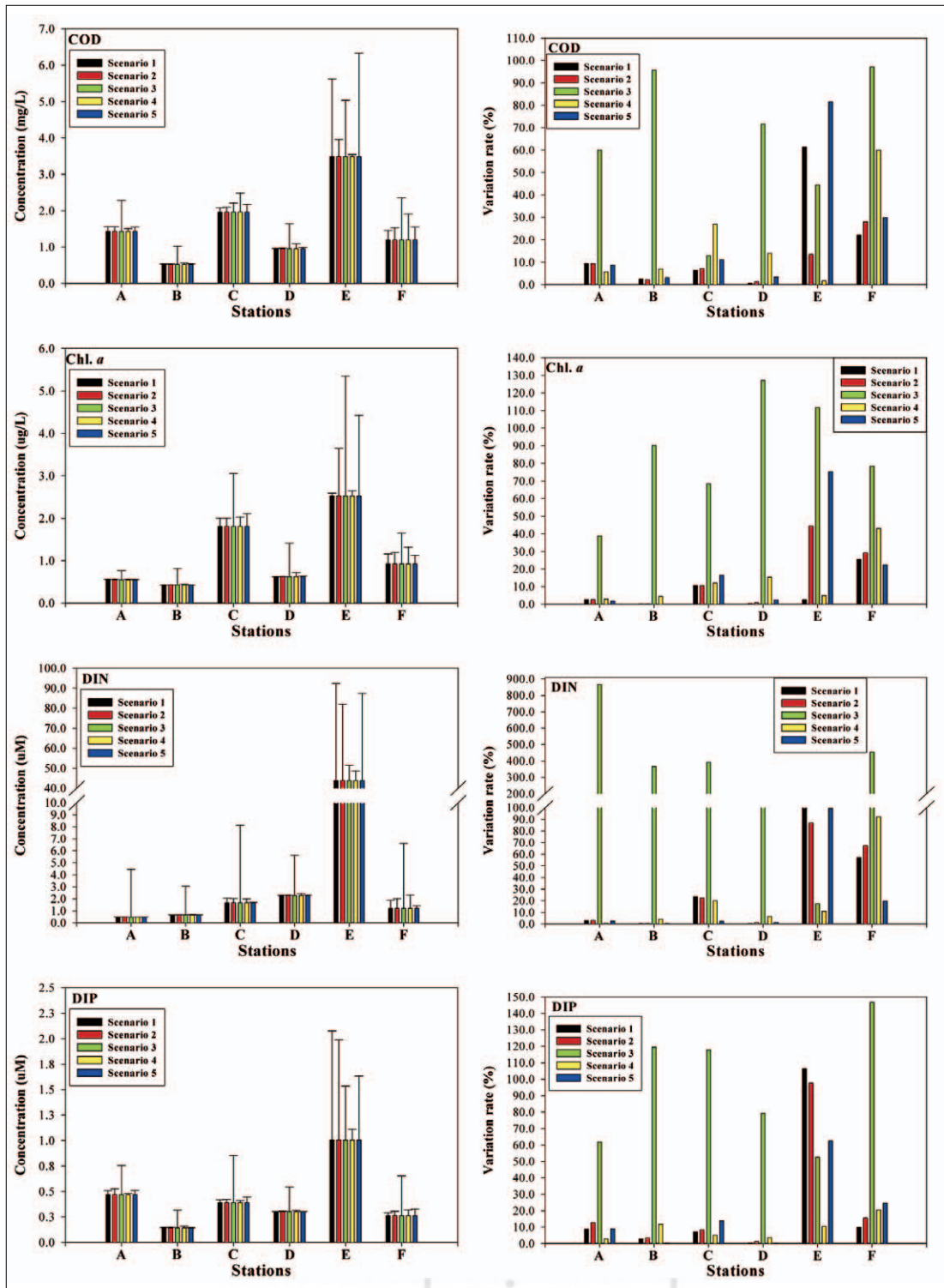


Fig. 6. Responses of water quality to scenario of environmental variation in the study area

43%로 최대, DIN과 DIP 또한 F에서 각각 92%와 20%로 최대를 보였다. 즉, F지점에서 가장 큰 응답 특성을 보였다. 시나리오 5에 따라서는 COD는 3-82% 범위로 E, F, C 순, Chl. a는 0-75%로 E, F, C 순, DIN은 0.5-99%로 E, F 순, 그리고 DIP도 0.1-63%범위로 E, F 순으로 가장 큰 변동을 나타내었다.

남해 근해인 C에서 COD 변동은 일사량의 영향이 13%, 바람의 영향이 27%, 모든 유입원을 차단했을 때는 11%, Chl. a변동은 일사량이 68%, 바람이 12%, 유입원 차단이 16%의 기여를 나타내었다, DIN 변동은 일사량이 390%, 유입원 농도와 유량변화가 각각 24%와 22%, DIP 변동은 일사량이 118%, 유입원 차단이 14%, 유입원 농도와 유량이 약 8%정도의 기여를 보였다. E지점에서는 COD는 유입원의 차단과 농도에 각각 82%와 61%로 변화하였고, 그리고 Chl. a는 일사량, 유입원 차단과 유량변화에 각각 112%, 75%와 44%로 변동을 나타내었다. DIN은 유입원 농도와 차단 및 유량변화에 각각 111%, 99%와 87%의 응답성을 나타내었다.

IV. 결론

본 연구는 황해 및 동중국해에서 격자시스템을 이용한 저차생태계 모델을 이용해서 주요 수질인자를 예측하였고, 특히 영양염류 부하량 변동 등 환경변화에 따른 응답특성을 평가하였다. 모델의 검증을 수행한 후 민감도 분석결과, 식물플랑크톤과 유기물의 무기화속도와 관련된 파라메타가 수질모의에서 가장 큰 영향을 끼쳤다. 수질인자들은 양쯔강 하구에서 가장 큰 농도를 보였고, 한반도 남해안에서도 상대적으로 높았지만, 황해 중앙부에서 낮은 분포를 보였다. 환경변화 시나리오에 따른 수질의 반응성은 다양하였는데, 오염부하량변화에 대해서 공간적으로는 양쯔강 하구 및 양쯔강 하구와 제주도 사이의 격자점에서 수질이 민감하게 반응하였다.

남해 연안에서 Chl. a는 태양 광 강도에 의해 68%가 변화되고, 모든 유입 부하량이 차단되었을

때는 16%, 그리고 바람에 따라서는 12% 변화되는 것으로 나타났다. 한편, DIN은 광 강도에 390%, 유입원의 농도변화에 의해 24%, 그리고 유입원의 방류량 변화에 22% 변화가 되었다. 반면, DIP는 광 강도에 의해 118%, 유입원의 차단에 의해 14%, 그리고 유입원의 부하량에 의해서는 8% 변화되는 것으로 평가되었다. 양쯔강 하구역에서 COD는 유입원의 차단과 농도에 각각 82%와 61%로 변화하였고, 그리고 Chl. a는 일사량, 유입원 차단과 유량변화에 각각 112%, 75%와 44%로 변동을 나타내었다. DIN은 유입원 농도와 차단 및 유량변화에 각각 111%, 99%와 87%의 응답성을 나타내었다. 태양의 광 강도, 유입원의 부하량 및 바람의 변화는 수질을 포함한 해양생태계에 큰 영향을 미치는 것으로 평가되었다.

이와 같이 시나리오에 따라 수질요소의 응답특성과 공간적인 응답률이 다르게 평가되었다. 수질관리적 측면에서 기후 및 기상인자의 조절은 매우 힘들기 때문에, 육상 유입원에 대한 관리방안이 매우 중요하다. 육역 근역 및 부하량이 큰 곳에는 유입원의 변화에 의해 민감하게 반응하므로 오염원 저감에 관한 지속적인 관리가 요구되고, 육상 유입원에 대해서 상대적으로 응답성이 약한 외해에서는 수질을 악화시킬 수 있는 해양투기 등의 환경용량을 산정해서 적절한 관리방안이 요구되고, 그리고 대기적 침적에 의한 수질영향에 관한 평가도 심도있게 연구되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원(RP-2012-ME-024)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

김광수, 1995, 생태계모형을 이용한 황해의 환경용량 산정, 부경대학교 대학원 환경공학과 박사학위 논문, 159p.

- Bowie, G.L., Pagenhopf, J.R., Rupp, G.L., Johnson, K.M., Chan, W.H., Gherini, S.A., Mills, W.B., Porcella, D.B. and Campbell, C.L., 1985, Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling, 2nd ed., EPA/600/3-85/040, USEPA, Athens, GA.
- Hare, S.R. and Mantua, N.J., 2000, Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989, *Prog. Oceanogr.*, 47, 103-145.
- Jorgensen, S.E., 1979, Handbook of Environmental Data and Ecological Parameters, International Society for Ecological Modeling.
- KCJRG(Korea-China Joint Research Group), 2006, Report of the Cooperative Environmental Research in the Yellow Sea between Korea and China, 2005, YSCER Report No. 9, Korea and China Joint Research Group, TR-2006-FR-005, 191p.
- KORDI(Korea Ocean Research & Development Institute), 1996, Management Technique for Marine Environmental Protection, Development of Prediction Techniques for Waste Dispersion in the Seas, MOE(Ministry of Environment) & MOST (Ministry of Science & Technology), 220p.
- Lee, D.I. and Kim, J.K., 2007, Numerical Simulation of Residual Currents and Low Salinity Dispersions by Changjiang Discharge in the Yellow Sea and the East China Sea, *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 10, 67-85. (in Korean)
- Lee, D.I., Choi, J.M., Lee, Y.G., Lee, M.O., Lee, W.C. and Kim, J.K., 2008, Coastal environmental assessment and management by ecological simulation in Yeosu Bay, Korea, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 80, 495-508, 2008.
- Lin, C., Ning, X., Su, J., Lin, Y. and Xu, B., 2005, Environmental changes and the responses of the ecosystems of the Yellow Sea during 1976-2000, *Journal of Marine Systems*, 55, 223-234.
- Mingjiang, Z., Tian, Y. and Jingzhong, Z., 2003, Primary study on the HAB characteristic in the Changjiang estuary and its adjacent sea area, *Chin. J. Appl. Ecol.*, 14, 1031-1038.
- Oh, J.H., 2001, Reviews on Changing Climate and Marine Environment, *J. Korean Soc. Fish. Res.*, 4, 1-19. (in Korean)
- Park, J.G., Shim, J.H. and Lee, J.B., 1998, Long-term Variation of Phytoplankton Biomass and Implication in the East and the South Sea, Korea, *Algae(The Korean Journal of Phycology)*, 13, 123-133.
- Rebstock, G.A. and Kang, Y.S., 2003, A comparison of three marine ecosystems surrounding the Korean peninsula: Responses to climate change, *Progress in Oceanography*, 59, 357-379.
- Taguchi, K. and Nakata, K., 1998, Analysis of water quality in Lake Hamana using a coupled physical and biochemical model, *Journal of Marine Systems*, 16, 107-132.
- Takeoka, H. and Murao, H., 1997, Response of Water Quality to the Reduction of Nitrogen or Phosphorus Load from the Land, *Bulletin on Coastal Oceanography*,

- 34, 183-190. (in Japanese)
- The Fisheries Science Institute, 2006, Report on Marine Ecosystem Research in the Coastal Waters of Korea and the East China Sea, The Fisheries Science Institute, Chonnam National University, Korea, 283p.
- Venrick, E.L., McGown, J.A., Cayan, D.G. and Hayward, T.L., 1987, Climate and chlorophyll a: long-term trends in the central North Pacific Ocean, *Science*, 238, 70-72.
- Wang, B.D., Wang, X.L. and Zhan, R., 2003, Nutrient conditions in the Yellow Sea and the East China Sea, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58, 127-136.
- Yanagi, T., Inoue, K., Montani, S. and Yamada, M., 1997, Ecological modeling as a tool for coastal zone management in Dokai Bay, Japan, *Journal of Marine Systems*, 13, 123-136.
- Yuan, D., Lin, B., Falconer, R.A. and Tao, J., 2007, Development of an integrated model for assessing the impact of diffuse and point source pollution on coastal waters, *Environmental Modelling & Software*, 22, 871-879.
- Zhang, G.S., Zhang, J. and Liu, S.M., 2007, Chemical composition of atmospheric wet depositions from the Yellow Sea and East China Sea, *Atmospheric Research*, 85, 84-97.
- Zhang, J., 1994, Atmospheric wet deposition of nutrient elements: Correlation with harmful biological blooms in Northwest Pacific Coastal Zones, *Ambio*, 58, 464-468.
- Zhang, Q.L. and Weng, X.C., 1996, Analysis of water masses in the south Yellow Sea in Spring, *The Yellow Sea*, 2, 74-82.
- Zuenko, Y.I., 2007, Application of a lower trophic level model to a coastal sea ecosystem, *Ecological Modelling*, 202, 132-143.

최종원고채택 12. 05. 25