

생태모델을 이용한 해상형 해양심층수 사업해역의 환경 특성 평가

김 동 명*

부경대학교 생태공학과

(2011년 5월 31일 접수; 2011년 6월 21일 수정; 2011년 7월 25일 채택)

Estimation of Environmental Characteristics for Deep Ocean Water Development Site Using Ecological Model

Dong-Myung Kim*

Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

(Manuscript received 31 May, 2011; revised 21 June, 2011; accepted 25 July, 2011)

Abstract

A ecosystem model was applied for understanding of circulation process of state variables in marine ecosystem. A mass balance was conducted by calculating the physical process. The sensitivity analysis was conducted to know which coefficient is the most effective factor to the state variables in the model. The results of the mass balance indicate that the primary production was 58.6 ton C/day in the case of mass flux. DIN and DIP in nutrient ingestion of phytoplankton were each 7.9 ton N/day, 1.1 ton P/day. POC and DOC in mineralization of organic matter were each 10.8 ton C/day, 40.6 ton C/day. The results of sensitivity analysis showed that the maximum growth rate of phytoplankton was the most important factor for overall state variables. In the case of nutrients, Half saturation constant of DIN, and mineralization rate of DOM for COD were important factor.

Key Words : Ecosystem model, Deep ocean water, Mass balance, Simulation, Sensitivity analysis

1. 서 론

인간에게 편리와 풍요를 가져다 준 산업과 물질이 환경오염과 자원고갈을 일으켜 우리를 위협하고 있다는 인식이 고조되면서, 생태계와 조화를 이루며 지속 가능한 발전을 하기 위한 자원 활용 방법을 연구함에 따라 해양심층수가 주목받기 시작하였다. 해양 심층

수는 저온성, 청정성, 안정성, 부영양성과 미네랄이 풍부한 특징이 있는 해양자원이며, 우리나라 동해에 무한히 부존하고 있다. 해양심층수를 이용하기 위한 해상형 해양심층수 사업해역의 환경적 특성을 해석할 필요가 있다(해양수산부, 2003).

해양심층수 사업해역의 생태계 해석을 위해서는 대상해역의 환경용량 산정, 심층수의 취수와 방류로 인한 대상해역의 영향 평가, 환경용량 및 환경위해성 평가를 통한 해상형 해양심층수의 적정 사업용량 평가, 사업해역의 환경변화 예측연구 등의 수행이 요구된다. 이러한 종합적인 해석을 위해서는 해역 내의 식물플랑크톤의 광합성을 규정하는 영양염의 순환을 포

*Corresponding author : Dong-Myung Kim, Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea
Phone: +82-51-629-6545
E-mail: dmkim@pknu.ac.kr

함한 생태학적 요소의 관계를 고려하는 생태계 모델의 이용이 필수적이다(홍 등, 2007; 이 등, 2000).

본 연구에서는 해양생태계 모델을 이용하여 물질수지를 산정하고 대상해역의 상태 변수 순환과정을 파악하였다. 용존무기질소 현존량이 시뮬레이션 결과에서 결정되기까지의 과정 중 이류와 확산작용에 의한 물리과정량을 산정하였으며, 이를 통해 해양 심층수 대상 범위 내의 어떤 지역에서 물질의 축적현상이 일어나는지를 파악하였다. 식물플랑크톤, 입자성 유기물, 용존유기물, 영양염 등이 어떤 인자들과 가장 민감하게 반응하는지의 민감도 분석을 수행하여 영향인자를 판별하고 해양환경에 대한 영향을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 생태계 모델

본 연구에서는 해수유동 시뮬레이션을 위한 다층 모델(COSMOS)(中田喜三郎, 1985)과 수질 시뮬레이션을 위한 생태계모델(EUTRP2)(日本通商産業省, 1991; Nakata, 1991)로 구성된 생태-유체역학 모델(eco- hydrodynamic model)이 사용되었다. 이 모델은 김 등(1999), 김과 김(2002), 김(2003), 조 등(1996), 최 등(1994)의 연구에 의해 개량되고 국내 연안해역에 대한 적용이 검토되었다. 생태계 모델에 적용된 해역의 임의의 지점에 있어 구성요소의 시간에 따른 현존량의 변화는 다음과 같은 방정식에 의해서 기술되며, 만해 흐름에 의한 물질수송을 계산하는 점에서 이 모델은 다층 모델과 연결되어있다.

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -u \frac{\partial B}{\partial x} - v \frac{\partial B}{\partial y} - w \frac{\partial B}{\partial z}$$

조석류 또는 잔차류에 의한 운반을 나타내는 항

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial B}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial B}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial B}{\partial z} \right]$$

난류확산에 의한 혼합을 나타내는 항

$$+ \frac{dB}{dt}$$

생물학적 및 화학적 과정을 나타내는 항 식(1)

여기서, x, y, z는 좌표변수, t는 시간, u, v, w는 x, y,

z방향의 유속성분, K_x, K_y, K_z 는 x, y, z 방향의 외동확산계수, B는 구성요소의 현존량, dB/dt 는 생물, 화학적 과정에 의한 단위시간당 구성요소의 변화량이다. 조석류 또는 잔차류에 의한 운반을 나타내는 항과 난류확산에 의한 혼합을 나타내는 항은 이류와 확산에 의해 대상물질이 물리적으로 이동, 확산되는 현상을 나타낸다. 유동모델의 시뮬레이션에서 계산된 유속성분을 생태계 모델에 입력하여 각 구성요소의 현존량의 시간적, 공간적인 변화를 계산한다. 식 (1)에서 생물학적 및 화학적 과정을 나타내는 부분을 용존무기질소에 관해 나타내면 식 (2)와 같이 기술된다.

$$\left(\frac{dDIN}{dt} \right) = -[N : C_p] \cdot v_1(T) \cdot \mu_1(DIP, DIN) \cdot \mu_2(I) \cdot P$$

식물플랑크톤에 의한 섭취

$$+ [N : C_{POM}] \cdot \frac{1}{1+K} \cdot v_6(T) \cdot POC$$

식물플랑크톤의 호흡

$$+ [N : C_p] \cdot v_2(T) \cdot P$$

동물플랑크톤의 배설

$$+ [N : C_z] \cdot (\mu - v) \cdot v_3(T) \cdot Z$$

현탁유기물의 분해

$$+ [N : C_{DOM}] \cdot v_7(T) \cdot DOC$$

용존유기물의 무기화

$$+ q_N$$

계외로부터의 공급 식(2)

용존무기질소의 농도가 줄어드는 부분은 식물플랑크톤의 영양염 섭취이며, 용존무기질소가 재생성되어 농도를 증가시키는 부분으로는 식물플랑크톤의 호흡과 동물플랑크톤의 배설 그리고 용존유기물의 무기화 등이 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대상지역

해상형 해양심층수 사업의 대상 후보지 중의 하나인 왕돌초 남측 해역 [36 45' N, 129 35' E ; 36 45' N, 129 50' E ; 36 30' N, 129 35' E ; 36.30' N, 129 50' E] 을 대상으로 연구를 수행하였다(Fig. 1).

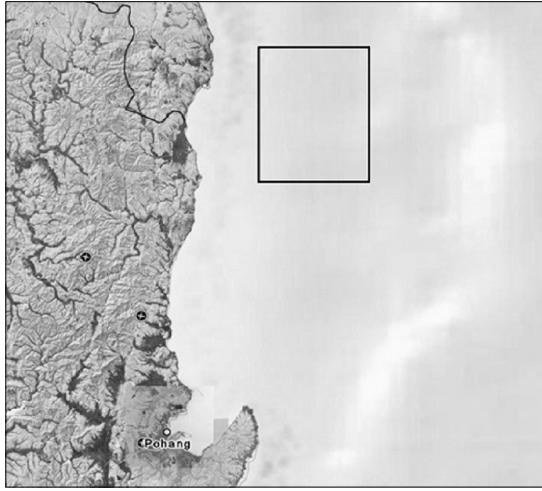


Fig. 1. Model region.

3.2. 상태변수의 분포계산

대상해역은 동서 및 남북방향으로 각각 500 m로 분할하였으며, 수심방향은 1층(0 ~ 20 m), 2층(20 ~ 60 m), 3층(60 ~ 100 m), 4층(100 ~ 140 m), 5층(140 m ~ 해저)으로 구분하여 격자의 총수는 13,920개(48×58×5)로 구성하였다. 초기치와 경계치 및 계수 값들은 한국해양환경 조사연보2004(국립수산과학원, 2005a) 및 해양조사연보(국립수산과학원, 2005b)와 기존의 연구(해양수산부, 2005; 환경부, 1997)에서 적용한 값들을 참고하여 Table 1과 같이 구성하였다. 해역의 유동장은 기존의 연구(국립수산과학원, 2005a; 국립수산과학원, 2005b; 해양경찰청, 2001; 해양과학공동연구소, 2001; 환경부, 1997)에서 산정된 값을 바탕으로 이용하였다.

Table 1. Input data for model

Parameters		Input values						
Mesh size		$\Delta x = \Delta y = 500 \text{ m}$						
Level		1 : 0 ~ 20 m						
		2 : 20 ~ 60 m						
		3 : 60 ~ 100 m						
		4 : 100 ~ 140 m						
		5 : below 140 m						
Total mesh		48×58×5 = 13,920						
Water depth		chart datum + MSL						
Time interval		50 sec						
Initial condition for compartments								
Temp	DO	COD	DIP	DIN	POC	DOC	PHYTO	ZOO
(°C)	(mg/L)		($\mu\text{g-at/L}$)			(mg-C/m ³)		
2.67	7.5	0.80	0.80	1.60	120.0	1500	30.0	5.0
~	~	~	~	~	~	~	~	~
23.89	8.5	0.80	0.80	1.80	120.0	1500	30.0	5.0
Boundary condition for compartments								
Temp	DO	COD	DIP	DIN	POC	DOC	PHYTO	ZOO
(°C)	(mg/L)		($\mu\text{g-at/L}$)			(mg-C/m ³)		
2.67	7.5	0.80	0.80	1.60	120.0	1500	30.0	5.0
~	~	~	~	~	~	~	~	~
23.89	8.5	0.80	0.80	1.80	120.0	1500	30.0	5.0
Calculation time	20 days							

Table 2. The biological parameters used in the ecosystem model

No.	Symbol	Definition	Unit	Values
1	α_1	Maximum growth rate of phytoplankton at 0°C	/day	0.67
2	α_2	Respiration rate of phytoplankton at 0°C	/day	0.01
3	α_3	Maximum grazing rate of zooplankton at 0°C	/day	0.18
4	α_4	Mortality rate of phytoplankton at 0°C	/day	0.01
5	α_5	Natural death rate of zooplankton at 0°C	/day	0.054
6	α_6	Mineralization rate of POC at 0°C	/day	0.010
7	α_7	Mineralization rate of DOC at 0°C	/day	0.003
8	α_8	Sediment release rate for dissolved phosphorous	mg/(m ² day)	9.0
9	α_9	Sediment release rate for dissolved nitrogen	mg/(m ² day)	25.0
10	α_b	Oxygen consumption rate of sediment at 0°C	mg/(m ² day)	1500
11	K_{SP}	Half saturation constant for uptake of DIP at 0°C	mg/L	0.10
12	K_{SN}	Half saturation constant for uptake of DIN at 0°C	mg/L	3.00
13	P^*	Function of grazing	mg C/m ³	75
14	μ	Digestion efficiency of zooplankton	%	70
15	ν	Total growth efficiency of zooplankton	%	30
16	λ	Ivlev index for grazing	/(mgC/m ³)	0.01
17	κ	Percentage of the quantity decomposed from POC to DOC to the quantity mineralized from POC	%	25
18	K^1DO	Half concentration of DO for mineralization of POC	mg/L	1.0
19	K^2DO	Half concentration of DO for mineralization of DOC	mg/L	1.0
20	K_a	Reaeration coefficient at sea surface	/day	0.25

생태계 모델의 수식화에 사용된 Table 2에 나타난 생물파라메타의 기호, 정의, 단위 및 적용값은 기존의 연구(해양수산부, 2005; 해양경찰청, 2001; 해양과학기술연구원, 2001; 환경부, 1997; Jorgensen 등, 2000)에서 산정된 값을 기초로 하여 구성하였다.

실측한 용존무기질소의 농도와 계산한 농도를 비교한 결과, 절대오차는 0.165 ~ 1.270 ug-at/L의 범위로 평균 0.648 ug-at/L를 보였고, 상대오차는 13.10 ~ 44.56 %의 범위로 평균 28.26 %로 계산되었다.

상태변수들 중 용존무기질소와 화학적산소요구량의 대상해역 내 분포를 산정하여 Fig. 2 ~ Fig. 5에 나타내었다. 용존무기질소의 경우 1층에서 0.3 ~ 2.0 ug-at/L 정도의 분포를 나타내었으며, 2층에서는 많은

지역에서 1.0 ug-at/L 이하의 값을 나타내었고, 1층의 경우와 같이 지역에 따라 급격한 농도 변화는 보이지 않았다. 화학적 산소요구량의 경우는 1층에서 0.2 ~ 1.0 mg/L 의 분포를 보였으며, 2층에서는 대부분의 지역에서 0.8 mg/L 이하의 값을 나타내었고, 대부분의 지역에서 더 낮은 농도로 분포한 것을 볼 수 있다.

용존무기질소와 화학적산소요구량의 경우 모두 1층에서는 남서쪽에서의 농도가 다소 높게 나타났고 북동쪽으로 가면서 낮아지는 형태를 보였으며, 2층에서는 북서쪽에서 다소 높은 농도가 나타났다. 전체적인 농도차이는 1층의 경우만큼 크지 않았다.

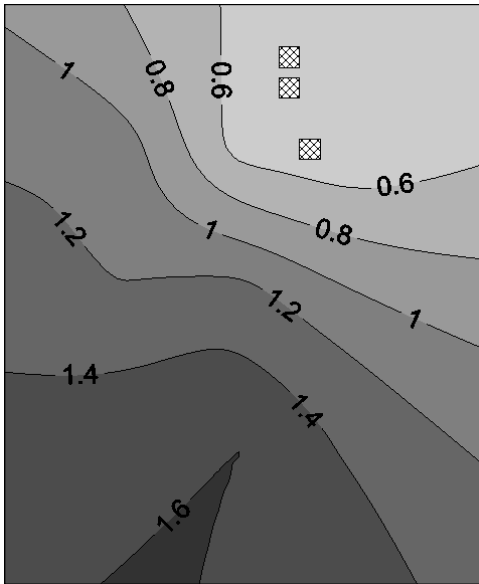


Fig. 2. The distribution of the simulated DIN in first level (ug-at/L).

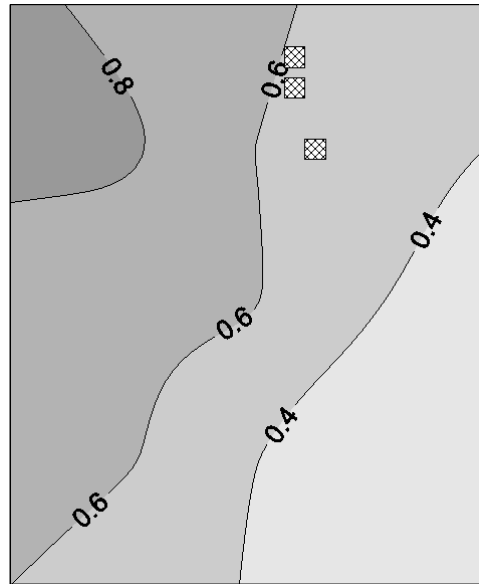


Fig. 3. The distribution of the simulated DIN in second level (ug-at/L).

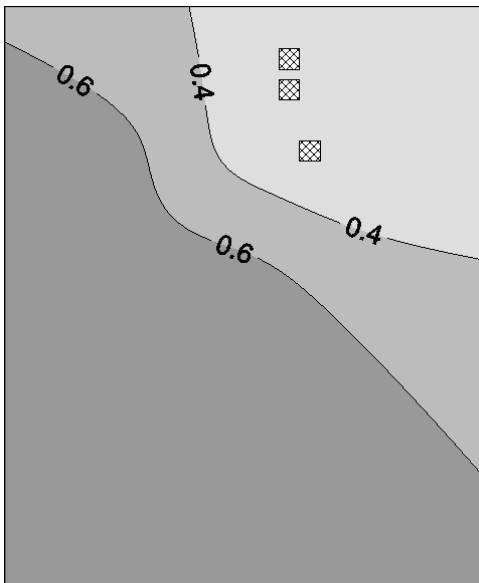


Fig. 4. The distribution of the simulated COD in first level (mg/L).

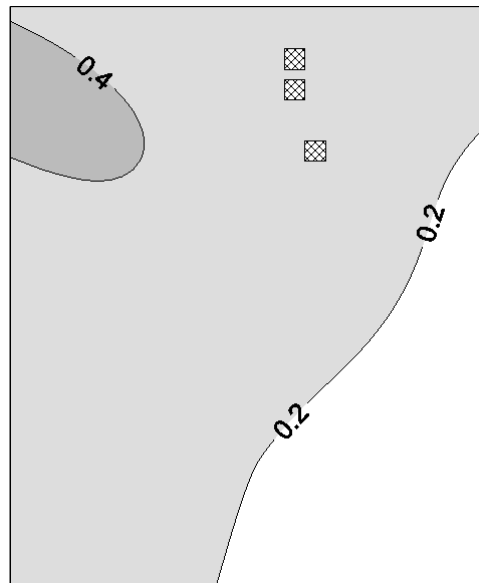


Fig. 5. The distribution of the simulated COD in second level (mg/L).

3.3. 상태변수의 물질수지

생태계 모델링 결과를 이용하여 대상해역 표층의 물질수지를 계산하였다.

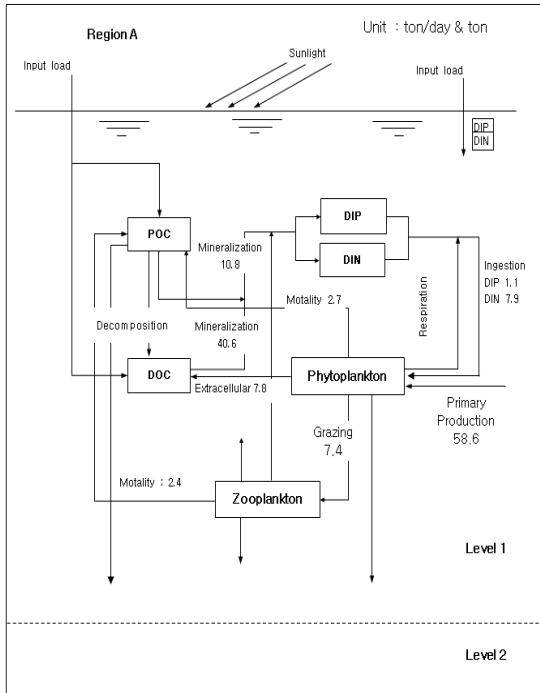


Fig. 6. Estimated of mass balance using the simulated results of eco-hydrodynamic model.

상태변수의 현존량의 경우, 식물플랑크톤과 동물플랑크톤이 각각 274.9 ton과 44.1 ton으로 계산되었고, 영양염류의 경우, 용존무기질소는 13.6 ton, 용존무기인은 6.9 ton으로 나타났다. 용존유기탄소의 현존량은 13,536.3 ton, 입자성유기탄소의 경우는 1,080.7 ton으로 평가되었다. 물질플럭스의 경우, 일차생산이 58.6 ton C/day로 나타났으며, 식물플랑크톤에 의한 영양염 섭취는 용존무기질소가 7.9 ton N/day, 용존무기인이 1.1 ton P/day로 계산되었다. 유기물의 무기화는 입자성유기탄소의 경우는 10.8 ton C/day, 용존유기탄소의 경우 40.6 ton C/day로 평가되었다. 산정된 물질수지는 추후 사업대상지에 대한 각 대안별 시나리오 분석시 물질수지의 변화를 고찰하는데 기초자료로 사용될 것으로 사료된다.

3.4. 민감도 분석

생물인자의 값이 문헌자료를 통한 값일 경우 그 모델의 구조적인 민감도를 분석하기 위해 사용한 생물인자의 값을 일정한 비율로 증감 시킨 후, 상태변수에 미치는 영향을 평가하는 민감도 분석(Dowd, 1997)을 수행하였다. 모델의 상태변수에 영향을 미치는 인자에 대한 민감도는 초기치로 시뮬레이션 한 계산값과 초기치를 2배 및 1/2배에 해당하는 값으로 조절하여 시뮬레이션 한 계산값을 이용하여 민감도 계수를 산정하여 평가하였다. 즉, 민감도 분석의 결과 값이 큰 경우일수록 그 특정인자가 상태함수의 농도결정에 미치는 영향이 커지는 것을 나타낸다.

그 결과, 식물플랑크톤의 성장에 가장 큰 영향을 주는 인자는 최대 성장속도였으며 -21.5 %와 +39.5 %의 값을 나타냈고, -17.2 %와 +21.7 %의 값을 나타낸 용존무기질소의 반포화 상수가 그 뒤를 이었다. 식물플랑크톤의 사멸속도와 동물플랑크톤의 섭식속도도 영향을 주는 것으로 나타났으며, 나머지 인자의 영향은 미미한 것으로 나타났다.

용존무기인의 경우, -21.9 %와 +11.9 %의 값을 보인 식물 플랑크톤의 최대성장속도가 가장 큰 영향인자로 판단되며, 그 다음으로는 용존무기질소의 반포화 상수였고, 다른 인자의 영향은 매우 작은 것으로 보였다.

용존무기질소의 경우, 가장 큰 영향인자는 식물 플랑크톤의 최대성장속도로써 -77.1 %와 +42.0 %의 값을 보였으며, 용존무기질소의 반포화 상수의 영향 또한 상당히 큰 것으로 나타났다.

입자성유기탄소의 경우는 입자성유기물의 분해속도의 영향이 -7.1 %와 +3.6 %로 상대적으로 크게 나타났으며, 그 이외의 인자에 의한 영향은 비교적 작은 것으로 판단된다.

화학적산소요구량의 경우, 용존유기물의 무기화속도의 영향이 가장 크게 나타났으며 그 다음으로는 식물플랑크톤의 성장속도였다.

Table 3. Sensitivity analysis of state variables by change of coefficients value

	PHYTO	ZOO	POC	DOC	DIP	DIN	DO	COD
Maximum growth rate / 2.0	-21.5	-0.1	0.0	0.0	11.9	42.0	-0.2	-0.9
Maximum growth rate x 2.0	39.5	0.1	0.0	0.1	-21.9	-77.1	0.4	1.7
Phytoplankton mortality / 2.0	4.0	0.0	-0.7	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0
Phytoplankton mortality x 2.0	-8.0	0.0	1.3	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0
Zooplankton grazing rate / 2.0	2.3	-2.8	-0.2	0.0	0.0	-0.2	0.0	0.0
Zooplankton grazing rate x 2.0	-4.6	5.6	0.3	0.0	0.1	0.4	0.0	-0.1
POM mineralization rate / 2.0	0.0	0.0	3.6	-0.1	0.0	-0.2	0.1	0.6
POM mineralization rate x 2.0	0.0	0.0	-7.1	0.1	0.0	0.4	-0.3	-1.3
DOM mineralization rate / 2.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	-0.7	0.6	2.8
DOM mineralization rate x 2.0	0.0	0.0	0.0	-2.1	0.1	1.4	-1.3	-5.5
DIP half saturation constant / 2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DIP half saturation constant x 2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DIN half saturation constant / 2.0	21.7	0.1	0.0	0.0	-12.0	-42.2	0.2	0.9
DIN half saturation constant x 2.0	-17.2	0.0	0.0	0.0	9.5	33.5	-0.2	-0.8

3.5. 물리 과정량

생태계 모델에 사용된 해역의 임의 지점에서 구성 요소의 현존량(B)의 시간에 따른 농도 변화는 방정식으로 기술되며, 생물학적, 화학적 과정의 항을 제외한, 이류와 확산에 의해서 대상물질이 물리적으로 이송, 확산되는 현상을 표현하는 부분을 대상물질의 물리과정량이라 한다(김, 1999).

모델의 각 cell 내에서 이 부분의 합이 0보다 크면 이류와 확산에 의한 대상물질의 유입량이 유출량보다 많음을 의미하여 각 구성요소의 축적 현상이 일어날 수 있음을 나타내고, 합이 0보다 작으면 유출량이 유입량보다 많음을 나타내므로 그 cell에서 인접 cell로 이송, 확산 될 가능성이 높음을 나타낸다(김, 2003). 이 결과는 심층수의 취수와 배수 위치를 선정하는데 참고자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 7과 Fig. 8에 생태계 모델을 이용한 용존무기 질소의 2층과 5층에서의 물리과정량 계산결과를 나타내었다. 이류 및 확산에 의한 영양염의 유입량이 유출량보다 많아 축적현상이 일어나는 지역은 검은색으로 표시하였으며, 유출량이 유입량보다 많아 cell로의 이송현상이 나타나는 지역은 흰색으로 표시하였다. Fig. 8에서, 지역에 따라 140 m 미만의 수심인 곳에 있는데, 이 지역은 사선으로 나타내었다.

2층의 경우에는 물리과정량이 대상해역의 중앙 부에서 0보다 작은 값을 나타내어 이류와 확산 현상이 탁월한 것으로 나타났으며, 그 외의 지역에서는 0보다



Fig. 7. The distribution of contributed physical process to DIN in second level(20~60 m).



Fig. 8. The distribution of contributed physical process to DIN in fifth level(140 m~).

큰 값을 나타내어 축적 현상이 일어나는 것으로 나타났다. 5층의 경우는 대상해역의 중앙부에서 주로 축적이 일어나는 것으로 평가되었다. 전반적으로 2층에서는 이송현상을 나타내는 지역이 다소 많은 것으로 나타났으며, 5층에서는 축적현상을 나타내는 지역이 다소 많은 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서 생태-유체역학모델을 이용하여 왕돌초 남측 해역에서의 상태변수의 순환과정을 파악하였으며, 환경인자 변동 예측 시뮬레이션으로 민감도 계수를 산정하여 영향인자를 평가하였고, 대상해역에 대한 영양염의 물리과정량을 산정하였다.

표층의 물질수지 계산 결과, 상태변수의 현존량의 경우, 식물플랑크톤과 동물플랑크톤은 274.9 ton과 44.1 ton, 영양염류의 경우 용존무기질소는 13.6 ton, 용존무기인은 6.9 ton으로 계산되었다. 용존유기탄소의 현존량은 13,536.3 ton, 입자성유기탄소의 경우는 1,080.7 ton으로 나타났다. 물질플럭스의 경우, 일차

생산이 58.6 ton C/day로 평가되었으며, 식물플랑크톤에 의한 영양염 섭취는 용존무기질소가 7.9 ton N/day, 용존무기인이 1.1 ton P/day로 계산되었다. 유기물의 무기화는 입자성유기탄소의 경우는 10.8 ton C/day, 용존유기탄소의 경우 40.6 ton C/day로 평가되었다. 산정된 물질수지는 각 대안별 시나리오 분석시 물질수지의 변화를 고찰하는데 기초자료로 사용될 것으로 사료된다.

민감도 분석결과, 상태변수에 전반적으로 가장 큰 영향을 주는 인자는 식물플랑크톤의 최대성장속도로 평가되었으며, 입자성유기탄소의 경우는 입자성유기물의 무기화이고, 화학적 산소요구량의 경우는 용존유기물의 무기화 속도가 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.

물리과정량 계산 결과, 2층의 경우, 대상해역의 중앙부가 0보다 작은 값이므로 이송현상이 높을 것으로 예상되며, 그 외의 지역에서는 0보다 큰 값을 나타내어 축적 현상이 일어나는 것으로 나타났다. 5층의 경우 대상해역의 중앙부에서 주로 축적이 일어나는 것으로 평가되었다. 전반적으로 2층에서는 이송현상을 나타내는 지역이 다소 많은 것으로 나타났으며, 5층에서는 축적현상을 나타내는 지역이 많은 것으로 나타났다. 물리과정량의 결과는 해양 심층수의 취수와 배수의 위치를 결정하는데 참고자료로 활용 될 수 있다.

감사의 글

본 연구논문은 해양수산부(해양심층수의 다목적 이용개발(6))의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- 국립수산과학원, 2005a, 한국해양환경 조사연보2004, 400.
- 국립수산과학원, 2005b, 해양조사연보, 285.
- 김광수, 김동명, 박청길, 1999, 3차원 해수유동모델을 이용한 황해 환경용량의 개략산정, 한국해양환경공학회지, 2(1), 63-73.
- 김중구, 김양수, 2002, 새만금 사업지구의 연안해역에서 부영양화관리를 위한 생태계모델의 적용 2. 오염부하의 정량적 관리, 한국수산학회지, 35(4), 356-365.

- 김동명, 1999, 생태계모델을 이용한 황해의 부영양화 모델링, 박사학위논문, 부경대학교.
- 김동명, 2003, 생태계모델을 이용한 가막만의 영양염 거동 특성 평가, 한국환경과학회지, 12(7), 745-751.
- 이대인, 김동명, 김형철, 이석모, 박청길, 2000, 낙동강 하구해역의 식물플랑크톤 극대역 변동에 관한 수치시뮬레이션 - II. 식물플랑크톤 극대역 변동의 수치시뮬레이션, 한국환경과학회지, 9(5), 375-383.
- 조은일, 박청길, 이석모, 1996, 가막만의 환경용량산정 (I) - 생태계모델을 이용한 기초생산력 산정, 한국수산학회지, 29(3), 369-385.
- 최우정, 박청길, 이석모, 1994, 진해만의 빈산소수괴 형성에 관한 수치실험, 한국수산학회지, 27(4), 414-433.
- 해양경찰청, 2001, 동해 병.정 폐기물배출해역 환경영향 평가 연구용역, 346.
- 해양과학공동연구소, 2001, 음식물 잔재물 해양배출에 따른 타당성 조사연구 보고서, 80.
- 해양수산부, 2003, 해양심층수의 다목적 개발 (2), 2차년도 최종보고서, 454.
- 해양수산부, 2005, 폐기물 해양배출 종합관리 시스템 구축 (I), 1062.
- 홍석진, 이원찬, 정래홍, 오현택, 장주형, 구준호, 김동명, 2007, 2003년 하계 진해만 수질 개선을 위한 생태계 모델링, 해양환경안전학회지, 13(2), 103-110.
- 환경부, 1997, 황해오염감시 및 개선기술, 374.
- 中田喜三郎, 石川公敏, 松川康夫, 1985, 内灣の流動場の數値實驗, 沿岸海洋研究ノト, 22(2), 96-108.
- 日本通商産業省, 1991, 兵名潮, 磐田地域, 産業公害 總合事前調査, 資源環境技術研究所, 80.
- Dowd, M., 1997, On predicting the growth of cultured bivalves, *Ecol. Model.*, 104, 113-131.
- Jorgensen, L. A., Jorgensen, S. E., Nielsen, S. N., 2000, *Ecological Modelling and Ecotoxicology*, Elsevier, Electronic DB file.
- Nakata, T. K., 1991, A model of the formation of oxygen depleted waters in Tokyo Bay, *KAIKOU*, 5(2), 1-26.