

## 생태계 모델을 이용한 제주도 남부연안해역의 환경용량 산정

김광수<sup>(1)</sup>, 최영찬<sup>(2)</sup>

### The Estimation of Environmental Capacity in the Southern Coastal Area of Cheju Island using an Ecosystem Model

by

Gwang-Su Kim<sup>(1)</sup> and Young-Chan Choi<sup>(2)</sup>

#### 요 약

제주도 남부연안해역을 대상으로 1997년 7월부터 1998년 6월 까지 매월 현장 조사와 수질 분석을 실시하였고, 생태계 모델을 이용한 시뮬레이션을 통하여 용존무기질소(DIP), 화학적 산소 요구량(COD) 및 용존산소(DO)의 수층별 분포를 재현하였다. 그리고 제주도 남부연안해역의 환경용량을 산정하기 위하여 해역수질 환경기준을 만족하지 못하는 환경악화 상태를 예측하는 수질 시뮬레이션이 실시되었으며, 이러한 예측 시뮬레이션은 생태계 모델을 이용하여 모델 해역으로 유입하는 주요 하천의 오염부하를 정량적으로 조절하면서 실시되었다. 그 결과 모델 해역으로 유입하는 4개 오염원으로부터의 오염부하가 증가할수록 오염원에 인접한 주변 해역에서 DIN, DIP 및 COD의 농도가 더욱 증가하는 것으로 나타났다. 하천을 포함한 4개 오염원 모두로부터의 오염부하가 현재 부하의 3배에 해당하는 경우, 오염원에 인접한 해역에서의 DIN 농도가 해역수질 환경기준의 3등급 기준인 0.20mg/ℓ 까지 증가하는 것으로 예측되었다. 또한 오염원 모두로부터의 오염부하가 현재 부하의 10배에 해당하는 경우, 오염원에 인접한 해역에서의 COD농도가 해역수질 환경기준의 1등급 기준인 1.0mg/ℓ 까지 증가하는 것으로 예측되었다. 그리고 오염원 모두로부터의 오염부하가 현재 부하의 20배에 해당하는 경우, 오염원에 인접한 해역에서의 DIP 농도가 해역수질 환경기준의 2등급 기준인 0.015mg/ℓ 까지 증가하는 것으로 예측되었다.

#### Abstract

The field surveys and the seawater analyses were conducted over the southern waters of Cheju island every month from July 1997 to June 1998. The distributions of dissolved inorganic nitrogen(DIN), dissolved inorganic phosphorus(DIP), chemical oxygen demand(COD) and dissolved oxygen(DO) in the southern water area of Cheju island were simulated and reproduced by an ecosystem model. In order to estimate the environmental capacity of the southern coastal area of Cheju island, the simulations for predicting the situation of unfavorable environment in which marine water quality might not be satisfied

(1) 정회원, 목포해양대학교 해상운송시스템학부, gwngskim@mail.mmu.ac.kr

(2) 정회원, 제주대학교 해양과학대학 해양학과, ycchoi@cheju.cheju.ac.kr

with Korean standards were performed with an ecosystem model by controlling quantitatively the pollution loads of discharge sources including streams flowing into the sea. The more the loads of 4 major pollution sources flowing into model region increase, the more evident appear the increases of COD, DIN and DIP concentrations around the water areas adjacent to pollution sources. In case the pollution loads of all 4 discharge sources including streams become 3 times as high as the present loads, the concentration of DIN at near-shore waters appears to be increased to about  $14.5\text{mmol/m}^3 (=0.20\text{mg/l})$  which is the third class criterion of Korean standards for marine water quality. In case of 10 times as high as the present loads, COD at near-shore waters appears to be increased to about  $1.0\text{mg/l}$  which is the first class criterion of Korean standards. In case of 20 times as high as the present loads, DIP at near-shore waters appears to be increased to about  $0.50\text{mmol/m}^3 (=0.015\text{mg/l})$  which is the second class criterion of Korean standards.

Keywords: COD, DIN, DIP, Environmental Capacity, Ecosystem Model, Marine Water Quality

## I. 서 론

제주도는 한반도의 남쪽에 위치한 섬으로서 그 주변이 황해, 동중국해 및 동해와 연계되는 해류와 수괴가 상존하는 해역이기 때문에 다양한 종류의 해양생물이 서식하는 천혜의 어장을 가지고 있다. 특히 제주도 남부해역은 고온·고염의 대마난류가 연중 영향을 미치는 해역으로서 아열대와 온대의 해양생물이 공존하는 독특한 연안생태계를 유지하고 있어서 보전 가치가 높은 지역이다. 그러나 서귀포의 관광중심 도시화, 활발한 개발 활동 등으로 인하여 제주도 남부연안해역에서 연안오염이 가속화되고 있는 실정이며, 또한 중문관광단지의 조성 과 화순화력발전소의 가동으로 인하여 연안 해역의 수질 환경은 직·간접적으로 영향을 받고 있다. 더욱이 경제적 배타수역의 선포에 따라 원양어장이 축소되고, 연안 개발 및 어류 남획 등에 의하여 연안어장의 황폐화가 가속되고 있다. 연안어장을 보호하고 연안환경을 보전하기 위하여 제주도 남부연안해역을 연안어장으로 목장화하고 또 해양국립공원화하는 계획이 추진되고 있다. 그러나, 연안어장 보호와 연안환경 보전을 위해서는 무엇보다 연안수질관리가 필요하며, 특히 자정능력이 기초를 둔 합리적 해양수질관리가 요구되고 있다.

해양의 수질을 합리적으로 관리하려면, 수질 특성을 파악하기 위한 현장 조사를 실시하고, 수질 자료에 근거한 수질 시뮬레이션을 통하여 장래의 수질을 예측함과 동시에 대상 해역의 환경용량을 파악함으로써 유입 오염부하를 해역의 자정능력 범위 내로 삭감하는 등 수질관리 방안을 강구해야 한다. 즉, 해역의 용도에 적합한 수질을 유지하기

위해서는 대상 해역이 악영향을 받지 않고 수용할 수 있는 최대의 오염부하량으로 정의되는 환경용량(西村[1977])의 범위 내로 유입 부하의 총량을 규제할 필요가 있다. 자정능력의 한계로 표현되는 환경용량은 수질 시뮬레이션을 통하여 산정이 가능하며 수질 시뮬레이션을 위해서는 수치 모델이 유용한 도구가 된다(藏本과 中田[1991]). 오염물의 수용 한계를 나타내는 수역의 환경용량을 설정하는 것은 오염물질의 배출에 대한 총량규제나 환경정책의 근거를 확실히 하기 위해서는 필요하지만, 설정된 환경용량까지는 환경을 악화시키는 것을 공인할 우려가 있기 때문에, 미약한 오염에 대해서도 생태계가 어떻게 변하는지를 구명하여야 하며, 과학적인 근거에 의하여 환경용량을 파악할 필요가 있다(西村[1977]). 한편, 해역내에서 식물플랑크톤의 광합성을 규정하는 용존산소, 질소 및 인의 순환을 거시적으로 표현할 수 있는 생태계 모델을 일본의 三河灣, 東京灣(藏本과 中田[1991]), 한국의 진해만(최 등[1994], 김 등[1994])과 마산만(김 등[1995]), 황해(김 등[1996]) 등에 적용한 연구는 이루어졌으나, 제주도 연안해역에 대하여 적용한 실례가 아직까지 없으며, 더구나 환경용량을 산정한 연구는 지금까지 수행되지 않았다.

따라서, 중문관광단지 과 화순화력발전소가 위치한 제주도 남부연안해역으로 하천수나 하수처리장 배출수를 통하여 오염물질이 얼마만큼 유입되면 해역에서 해역수질 환경기준에 미달하는 환경 악화 현상이 나타나는지를 생태계 모델(通商産業省[1986])을 이용하여 계산함으로써 제주도 남부해역이 가지고 있는 환경의 수용력, 즉 환경용량을 산정하고자 하였다. 이렇게 산정된 환경용량은 제

주도 남부해역의 수질환경을 평가하는 기준으로서, 또한 해역으로 유입하는 오염부하량을 제어하는 수질관리기준으로서 활용될 수 있을 뿐만 아니라 해양환경관리를 위한 정책 자료로서 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 현황 조사

#### 2.1.1 수질

수질을 조사하기 위하여 1997년 7월에서 1998년 6월까지 매월에 Fig. 1에 표시된 6개의 정점(A~F)에서 Niskin 채수기로써 수층별(표층, 10m, 20m, 30m, 50m, 75m)로 채수한 후, 실험실로 신속히 운반하여 분석하였다. 수온, 투명도, 염분 및 용존산소는 각각 봉상온도계, 투명판, 염분계(SM-2000) 및 용존산소계(YSI 57)를 이용하여 현장에서 측정하였으며, 용존산소(DO)는 Winkler-Azide 변법을 이용하여 실험실에서 한번 더 측정하였다. 화학적 산소요구량(COD)은 알칼리성 과망간산칼륨법에 의해서 정량하였다. 암모니아질소(NH<sub>3</sub>-N), 아질산질소(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N), 질산질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N), 인산인(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P) 및 클로로필 a(Chl.-a)는 Strickland & Parson[1972]의 방법에 의해 각각 비색정량하였다. 그리고 총무기질소(DIN)는 NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N을 합하여 산정하였다.

#### 2.1.2 유량 및 오염부하량

제주도 남부 해역으로 유입되는 5개의 지점, 즉

화순소하천(S1), 화순화력발전소(S2), 황개천(S3), 하수종말처리장(S4) 및 증문천(S5)의 유량을 1997년 7월에서 1998년 6월까지 매월 측정함과 동시에 시수를 채수한 후, 실험실로 신속히 운반하여 수온, pH, 용존산소, 생화학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량, 부유물질, 암모니아질소, 아질산질소, 질산질소, 인산인에 대하여 분석하였다. 그리고 각 유입 지점의 유량과 수질분석 자료를 이용하여 오염부하량을 산정하였다. 그러나 대기로부터의 오염부하는 고려하지 않았다.

### 2.2 생태계 모델(Ecosystem Model)

생태계 모델(EUTRP2)은 8개의 구성요소, 즉 식물플랑크톤(P), 동물플랑크톤(Z), 입자유기탄소(POC), 용존유기탄소(DOC), 용존무기인(DIP), 용존무기질소(DIN), 용존산소(DO) 및 화학적 산소요구량(COD)으로 이루어졌으며, 해양생태계 내의 각 구성요소들 사이에 질소(N), 인(P) 및 산소(O<sub>2</sub>)의 생화학적인 순환 과정을 자세하게 수식화하였다. 생태계 시뮬레이션(ecosystem simulation)을 통하여 생태계 내의 영양염(N, P)의 순환 과정을 해석함과 동시에 COD의 내부 생산과 용존산소(DO) 변화를 동적으로 예측할 수 있다. 이 모델은 생태계 내의 물질 보존을 나타내는 미분방정식으로 구성되어 있지만, 모든 순환 경로가 실험이나 관측 사실에 기인한 경험식에 따르고 있다(通商産業省[1986]).

제주도 남부해역의 모델 영역은 Fig. 1과 같이 93×43×3의 격자로 구성되었다. 한 격자의 크기는 동서방향과 남북방향은 동일하게 185.2m이며, 수층은 유동 특성, 유광층 및 수온약층의 깊이를

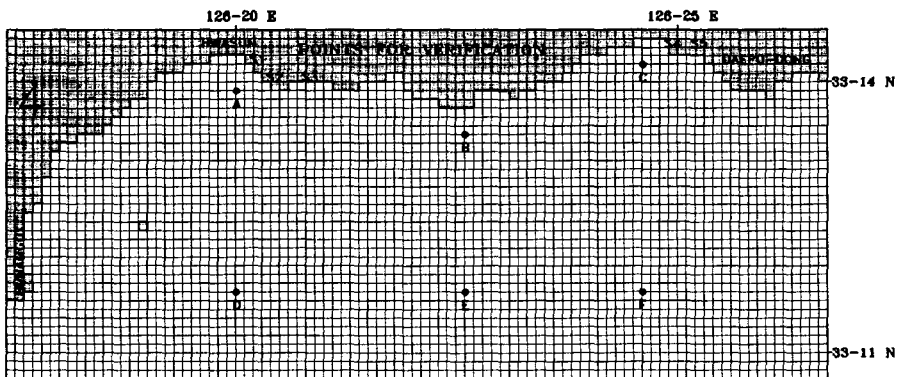


Fig. 1 Location of stations for sampling seawater and finite-difference grid of the 3-dimensional ecosystem model in the southern coastal area of Cheju Island.

고려하여 3개의 층, 즉 표층(Level 1: 해면~수심 20m), 중층(Level 2: 수심 20m~50m), 저층(Level 3: 수심 50m~해저)으로 구분하였다. 모델 영역내에서 해수 유동을 재현하기 위해서 M2분조의 조위와 위상을 이용하였고, 지형 및 수심은 해도(No. 218과 No. 254)의 자료를 이용하였으며, 하천을 포함한 육상 유입원으로부터 모델 해역으로 유입하는 유량은 하계의 유량을 적용하였다. 그리고 유동이 정상상태에 도달한 마지막 한 주기의 조석류를 조석 주기로 평균한 항류를 잔차류로 하여 수질 예측을 위한 생태계 시뮬레이션에 이용하였다. 그리고 실측 자료를 근거로 적용한 초기·경계 조건, 오염부하 등 생태계 모델의 입력 자료는 Table 1과 같다. 여기서 식물플랑크톤(Phytoplankton)과 동물플랑크톤(Zooplankton)의 자료는 Chlorophyll-a량(mg/m<sup>3</sup>)과 동물플랑크톤 생물량(mg/m<sup>3</sup>)의 실측 자료(서귀포시[1993]) 및 환산계수(Jorgensen[1979])를 이용하여 결정하였다.

### 2.3 환경용량 산정

생태계 시뮬레이션을 통하여 얻은 각 구성요소의 계산값이 하계의 제주도 남부 해역 수질 조사에서 얻은 실측값과 최대한 잘 일치할 때까지 각종 계수값을 보정하였다. 이렇게 보정된 계수값을 이용하여 재현한 하계 제주도 남부 해역의 구성요소들에 대한 분포를 검증하기 위해서 6개 수질 조사 정점에 대하여 각 구성요소의 계산값과 실측값을 비교하였다. 검증된 현재의 구성요소들에 대한 분포를 기준으로 육상 유입원의 오염 부하량을 DO에 대하여는 현부하량으로 고정시키고 COD, DIP, DIN, POC, DOC에 대하여는 모두 동시에 일률적으로 단계별로 증가시키면서 생태계 시뮬레이션을 실행함으로써 제주도 남부 해역에서 하계의 각 구성요소에 대한 변화를 정량적으로 예측하였다. 그래서 각 구성요소의 농도가 한국의 해역수질 환경기준을 만족시키면서 제주도 남부 해역이 수용할 수 있는 최대의 오염부하량을 환경용량으로 산정하였다.

Table 1 Input data for an ecosystem model

Parameters	Input value
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 185.2m$
Water depth	Chart datum + MSL
Time interval	6.0 sec.
Horizontal viscosity coefficient	$1.0 \times 10^5 (cm^2/s)$
Horizontal diffusion coefficient	$1.0 \times 10^5 (cm^2/s)$
Vertical diffusion coefficient	$0.5 (cm^2/s)$

#### Initial and boundary conditions for compartments

Level	DO mg/ℓ	COD mg/ℓ	DIP mmol/m <sup>3</sup>	DIN mmol/m <sup>3</sup>	POC mg-C/m <sup>3</sup>	DOC mg-C/m <sup>3</sup>	PHYTO* mg-C/m <sup>3</sup>	ZOO* mg-C/m <sup>3</sup>
1 ( 0-20m )	6.03	0.94	0.154	0.651	905	705	63.0	5.3
2 ( 20-50m )	5.00	1.09	0.373	8.328	1161	817	21.3	2.1
3 ( 50-BTm )	4.60	1.03	0.647	9.550	1240	772	6.4	0.8

#### Pollution loads

Source of discharge	COD (kg/day)	DO (kg/day)	DIP (kg/day)	DIN (kg/day)	POC (kg/day)	DOC (kg/day)
Hwasun Stream (S1)	9.805E+0	1.412E+2	2.807E+0	2.932E+2	1.067E+1	7.386E+0
Thermal electric station (S2)	6.994E+1	7.400E+2	3.663E-1	1.009E+1	9.137E+1	5.245E+1
Hwangkae Stream (S3)	1.901E+1	8.364E+1	1.198E+0	1.309E+2	3.041E+0	1.426E+1
Sewage treatment plant (S4)	1.037E+1	4.303E+1	8.916E-1	1.018E+2	4.251E+0	7.776E+0
Joongmoon Stream (S5)	9.539E+1	1.729E+2	3.219E+0	3.995E+2	1.033E+1	7.154E+1

PHYTO\* : Phytoplankton , ZOO\* : Zooplankton

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 생태계 시뮬레이션

Table 1의 초기·경계 조건과 5개 유입 지점의 오염부하량을 모델에 입력한 후, 시뮬레이션을 실행하여 얻은 표층의 용존무기질소(DIN), 화학적 산소요구량(COD) 및 용존무기인(DIP)의 분포를 각각 Fig. 2, Fig. 3 및 Fig. 4에 제시하였다.

#### 3.1.2 용존무기질소(DIN) 분포의 재현

Fig. 2에 제시한 표층(0~20m)의 용존무기질소(DIN)는 전반적으로  $4.0 \sim 7.0 \text{ mmol/m}^3 (=0.056 \sim 0.098 \text{ mg/l})$ 의 분포를 보여 해역수질 환경기준의

2급수(=0.1mg/l 이하)를 나타내고 있으나, 화순소하천(S1)과 황개천(S3)의 하천수가 유입되는 화순 연안 수역에서는  $7.0 \sim 8.50 \text{ mmol/m}^3 (=0.098 \sim 0.119 \text{ mg/l})$ 의 분포가 나타나고 하수종말처리장(S4)의 유출수와 중문천(S5)의 하천수가 유입되는 중문관광단지 연안 수역에서는  $8.0 \sim 10.0 \text{ mmol/m}^3 (=0.112 \sim 0.140 \text{ mg/l})$ 의 분포가 나타나서 육지에 가까운 연안 수역의 용존무기질소는 3급수(=0.2mg/l 이하)에 해당하였다.

#### 3.1.3 화학적 산소요구량(COD) 분포의 재현

Fig. 3에 제시한 표층(0~20m)의 화학적 산소요구량(COD)은 제주도 남부 해역 전역에서  $0.7 \sim 1.2 \text{ mg/l}$ 의 농도 분포를 보임으로써, 남서쪽에 위치한

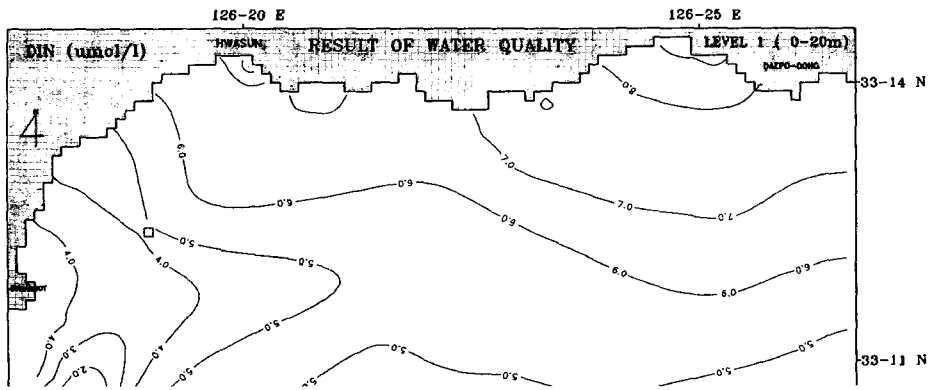


Fig. 2 The distribution of dissolved inorganic nitrogen(DIN) on surface level simulated under the present condition of pollution loads from 5 sources of discharge.

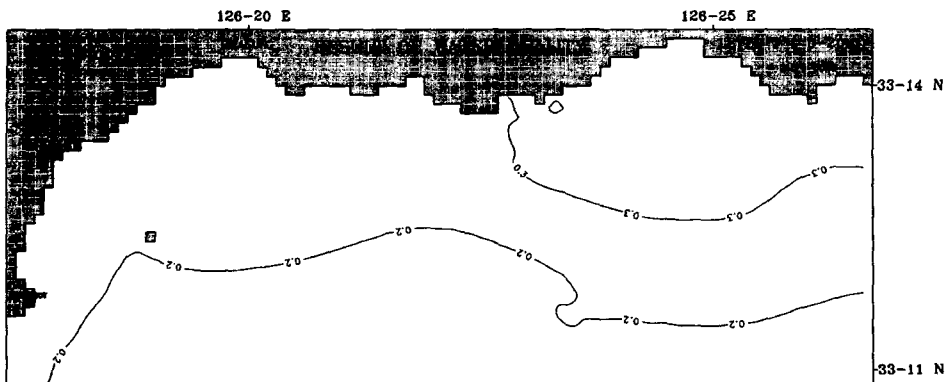


Fig. 3 The distribution of dissolved inorganic phosphorus(DIP) on surface level simulated under the present condition of pollution loads from 5 sources of discharge.

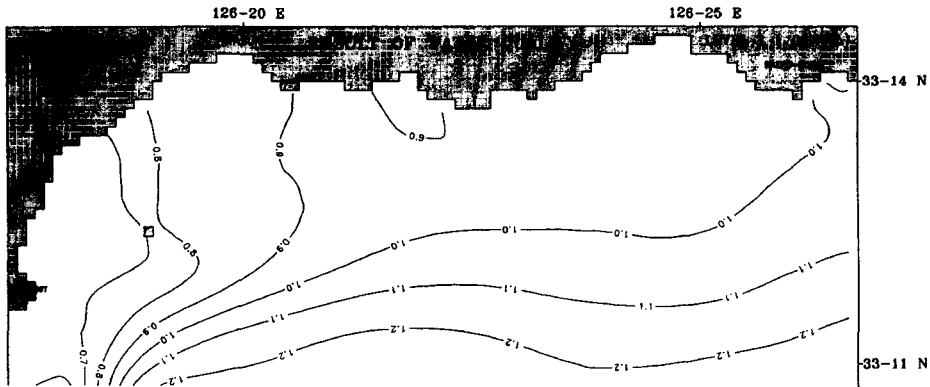


Fig. 4 The distribution of chemical oxygen demand(COD) on surface level simulated under the present condition of pollution loads from 5 sources of discharge.

부남곶을 통과하는 북위 33° 12' 위도선을 기준으로 외양쪽은 1.0~1.2mg/l의 분포를 보여 2급수(=2.0mg/l 이하)를 나타내고 있으나, 연안쪽은 1.0mg/l 이하의 분포를 보여 1급수(=1.0mg/l 이하)를 유지하고 있다. 이렇게 COD가 외양쪽보다 연안쪽에서 낮게 나타나는 것은 육지오염원으로부터 유입되는 COD부하가 상대적으로 작다는 사실, 해역의 해수유동 등과 관련이 있는 것으로 해석된다.

### 3.1.1 용존무기인(DIP) 분포의 재현

Fig. 4에 제시한 표층(0~20m)의 용존무기인(DIP)은 남서쪽에 위치한 부남곶을 통과하는 북위 33° 12' 위도선을 기준으로 외양쪽은 0.2mmol/m<sup>3</sup>(=0.006mg/l)이하의 분포를 보여 1급수(=0.007mg/l 이하)를 나타내지만, 연안쪽은 0.20~0.36mmol/m<sup>3</sup>(=0.006~0.011mg/l)의 분포를 보여 2급수(=0.015mg/l 이하)를 유지하고 있다.

## 3.2 생태계 시뮬레이션의 검증

생태계 시뮬레이션의 재현성을 검증하기 위해서 6개 조사 정점에서 수층별 구성요소별 실측값과 계산값을 비교하여 Table 2에 제시하였다.

### 3.2.1 용존무기질소(DIN)

용존무기질소(DIN)의 실측값에 대한 계산값의 상대오차가 육지쪽에 위치한 A, B, C정점의 표층(0~20m)에서는 -11.2~+19.1%로서 재현이 양호하였다. 그리고 외양쪽에 위치한 D, E, F정점에서는 표층(0~20m)에서 -7.5~+15.3%, 중층(20~50m)에서 -14.3~+18.2%를 나타내고, E정점의 저

층(50m이심)에서는 +9.8%를 나타내어 재현이 양호하였다. 그래서 제주도 남부해역에서 용존무기질소의 재현성은 양호한 것으로 나타났다.

### 3.2.2 용존무기인(DIP)

용존무기인(DIP)의 실측값에 대한 계산값의 상대오차가 육지쪽에 위치한 A, B, C정점의 표층(0~20m)에서는 -16.0~-16.7%로서 재현이 양호하였다. 그리고 외양쪽에 위치한 D, E, F정점에서는 표층(0~20m)에서 -6.3~+4.5%, 중층(20~50m)에서 -11.8~+19.2%를 나타내고, E정점의 저층(50m이심)에서는 +17.9%를 나타내어 재현이 양호하였다. 그래서 제주도 남부해역에서 용존무기인의 재현성은 양호한 것으로 나타났다.

### 3.2.3 화학적 산소요구량(COD)

화학적 산소요구량(COD)의 실측값에 대한 계산값의 상대오차가 육지쪽에 위치한 A, B, C정점의 표층(0~20m)에서는 -10.0~-16.7%로서 재현이 양호하였다. 그리고 외양쪽에 위치한 D, E, F정점에서는 표층(0~20m)에서 -4.8~+10.0%, 중층(20~50m)에서 +1.9~+13.0%를 나타내고, E정점의 저층(50m이심)에서는 +10.9%를 나타내어 재현성이 양호하였다. 그래서 제주도 남부해역에서 화학적 산소요구량의 재현성은 양호한 것으로 나타났다.

### 3.2.4 용존산소(DO)

용존산소(DO)의 실측값에 대한 계산값의 상대오차가 육지쪽에 위치한 A, B, C정점의 표층(0~20m)에서는 -4.6~+1.5%로서 재현이 매우 양호하

Table 4 Comparison of the computed with the observed water quality data in model area of Cheju Island

St	Level	DIN(mmol/m <sup>3</sup> )			DIP(mmol/m <sup>3</sup> )			COD(mg/ℓ)			DO(mg/ℓ)		
		Comp. (A)	Obs. (B)	R.E.(%) (B-A)/B	Comp. (A)	Obs. (B)	R.E.(%) (B-A)/B	Comp. (A)	Obs. (B)	R.E.(%) (B-A)/B	Comp. (A)	Obs. (B)	R.E.(%) (B-A)/B
A	1 (Surface)	6.88	6.39	- 7.7	0.28	0.24	-16.7	0.84	0.72	-16.7	6.46	6.56	+1.5
B	1 (Surface)	7.00	8.65	+19.1	0.29	0.25	-16.0	0.98	0.87	-12.6	6.21	6.22	+0.2
C	1 (Surface)	8.92	8.02	-11.2	0.35	0.30	-16.7	0.99	0.90	-10.0	6.35	6.07	-4.6
D	1 (Surface)	4.46	5.15	+13.4	0.15	0.15	0.0	0.99	1.10	+10.0	5.92	5.97	+0.8
	2 (Middle)	5.32	6.39	+16.7	0.21	0.26	+19.2	0.97	1.02	+ 4.9	5.66	5.41	-4.6
E	1 (Surface)	5.48	5.10	- 7.5	0.17	0.16	- 6.3	1.14	1.12	- 1.8	5.78	5.76	-0.3
	2 (Middle)	8.25	7.22	-14.3	0.35	0.41	+14.6	1.06	1.23	+13.8	5.12	4.99	-2.6
	3 (Bottom)	8.77	9.72	+ 9.8	0.46	0.56	+17.9	1.06	1.19	+10.9	4.73	4.40	-7.5
F	1 (Surface)	5.89	6.95	+15.3	0.21	0.22	+ 4.5	1.09	1.04	- 4.8	5.75	5.84	+1.5
	2 (Middle)	7.85	9.60	+18.2	0.38	0.34	-11.8	1.05	1.07	+ 1.9	5.01	5.31	+5.6

St : Station , R.E : Relative error

였다. 그리고 외양쪽에 위치한 D, E, F정점에서는 표층(0~20m)에서 -0.3~+1.5%, 중층(20~50m)에서 -4.6~+5.6%를 나타내고, E정점의 저층(50m이심)에서는 -7.5%를 나타내어 재현이 매우 양호하였다. 그래서 제주도 남부 해역에서 용존산소의 재현성은 매우 양호한 것으로 나타났다

### 3.3 오염부하량의 증가에 따른 수질 예측

화순화력발전소(S2)를 제외한 4개의 육상 오염원으로부터 유입되는 오염부하량, 즉 COD, DIP, DIN, POC 및 DOC를 모두 동시에 일률적으로 현재 부하량의 2배에서 30배까지 단계적으로 증가시켜서 모델 해역으로 유입시켰을 경우를 시물레이션하였으며, 그 중에서 3배, 10배 및 20배로 증가시킨 경우에 대하여 각 구성요소의 예측 분포를 제시하였다. 그러나 용존산소(DO)에 대한 중·저층에서의 현분포가 3급수(=5.0mg/ℓ 이상)에도 미달하는 수역이 나타나기 때문에 용존산소에 대한 예측 결과는 제시하지 않았다.

#### 3.3.1 오염부하를 3배로 증가시킨 경우

오염부하를 현재 오염부하의 3배로 증가시켜서 모델 해역으로 유입시켰을 경우를 시물레이션한 결과, 화학적 산소요구량(COD)과 용존무기질(DIP)에 대한 각 수층별 분포는 현재 분포와 비교하여 뚜렷한 차이를 보이지 않았고, 용존무기질소(DIN)의 분포는 현재 분포와 비교하여 중층과 저층에서

는 차이가 없었으나 표층에서는 차이가 나타났다.

Fig. 5에 제시한 표층(0~20m)의 용존무기질소(DIN)는 남서쪽에 위치한 형제도와 부남곶 사이의 해역에서 4.0mmol/m<sup>3</sup>(=0.056mg/ℓ)이하로서 1급수(=0.05mg/ℓ 이하)를 나타내고, 모델 해역의 북서 해역에서 중앙해역을 거쳐서 동남해역에 이르는 해역에서 4.0~7.0mmol/m<sup>3</sup>(0.056~0.098mg/ℓ)의 농도 분포로서 2급수(=0.1mg/ℓ 이하)를 보였으나, 육상의 오염부하 유입원이 위치하는 연안에 인접한 해역에서는 7.0~14.5mmol/m<sup>3</sup>(=0.098~0.203mg/ℓ)의 농도 분포를 보임으로써 3급수(=0.2mg/ℓ 이하)를 나타내었다. 이러한 결과를 Fig. 2에 제시된 현재의 용존무기질소 농도 분포와 비교하면, 제주도 남부 해역의 용존무기질소를 3급수로 유지하기 위한 환경용량은 현재 오염부하량의 3배에 해당한다.

#### 3.3.2 오염부하를 10배로 증가시킨 경우

오염부하를 현재 오염부하의 10배로 증가시켜서 모델 해역으로 유입시켰을 경우를 시물레이션한 결과, 화학적 산소요구량(COD)에 대한 각 수층별 분포는 현재 분포와 비교하여 뚜렷한 차이를 보이지 않은 반면에 용존무기질소(DIN)의 표층 분포는 더욱 뚜렷한 차이를 보였고, 용존무기질(DIP)의 분포는 현재 분포와 비교하여 중층과 저층에서는 차이가 없었으나 표층에서는 차이가 나타났다.

Fig. 6에 제시한 표층(0~20m)의 화학적 산소요구량(COD)은 남서쪽에 위치한 부남곶을 통과하

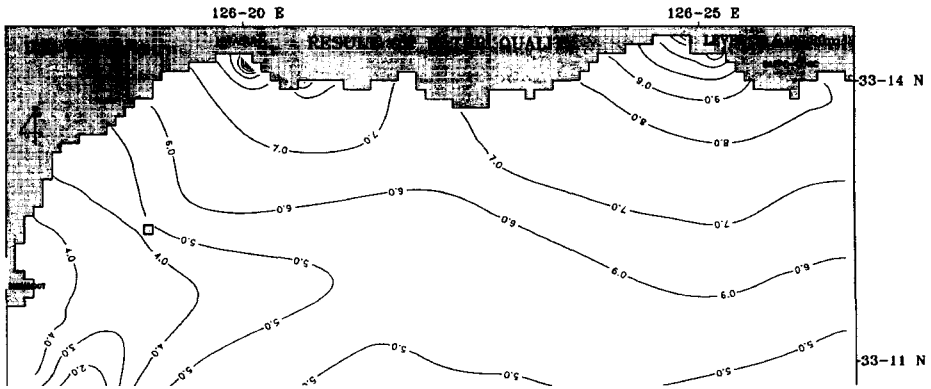


Fig. 5 The distribution of dissolved inorganic nitrogen(DIN) on surface level simulated under the condition of loads three times as high as the present pollution loads from 4 sources of discharge.

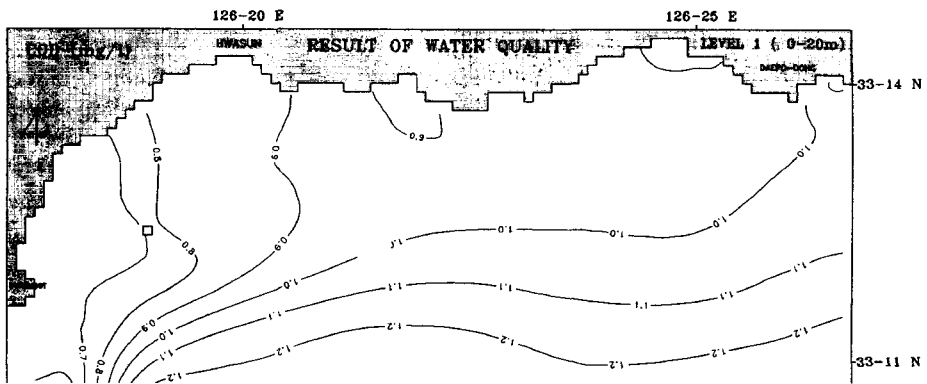


Fig. 6 The distribution of chemical oxygen demand(COD) on surface level simulated under the condition of loads ten times as high as the present pollution loads from 4 sources of discharge.

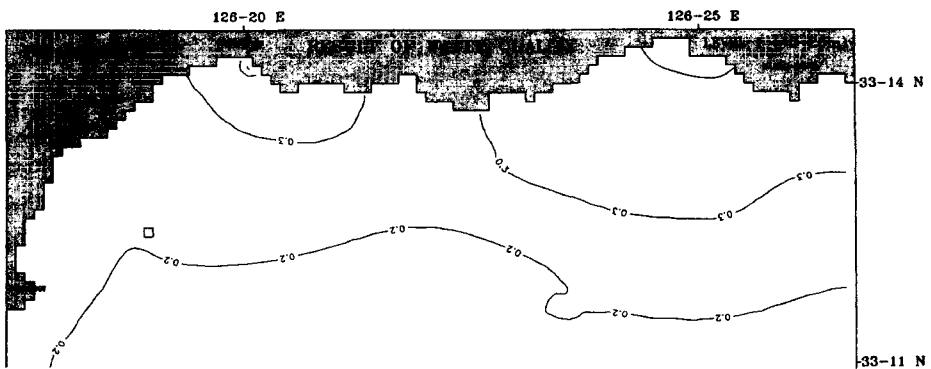


Fig. 7 The distribution of dissolved inorganic phosphorus(DIP) on surface level simulated under the condition of loads twenty times as high as the present pollution loads from 4 sources of discharge.



는 북위 33° 12' 위도선을 기준으로 외양쪽은 1.0~1.2mg/ℓ의 분포를 보여 2급수(=2.0mg/ℓ 이하)를 나타내고 있어서 Fig. 3에서 제시한 현재의 분포와 동일하지만, 연안쪽은 1.0mg/ℓ 이하의 분포를 보여 1급수(=1.0mg/ℓ 이하)를 유지하고 있다. 그러나, 하수종말처리장(S4)의 유출수와 증문천(S5)의 하천수가 유입되는 증문관광단지 연안 수역에서는 1.0mg/ℓ 이상의 분포가 나타나고 있다. 이러한 결과를 Fig. 3에 제시된 현재의 화학적 산소요구량 농도 분포와 비교하면, 제주도 남부 해역의 화학적 산소요구량을 1급수로 유지하기 위한 환경용량은 현재의 오염부하량의 10배에 해당한다.

### 3.3.3 오염부하를 20배로 증가시킨 경우

오염부하를 현재 오염부하의 20배로 증가시켜서 모델 해역으로 유입시켰을 경우를 시뮬레이션한 결과, 용존무기질소(DIN)과 화학적 산소요구량(COD)에 대한 표층의 분포는 현재 분포와 비교하여 한층 더 뚜렷한 차이를 보였고, 용존무기인(DIP)의 분포는 현재 분포와 비교하여 중층과 저층에서는 차이가 없었으나 표층에서는 차이가 나타났다.

Fig. 7에 제시한 표층(0~20m)의 용존무기인(DIP)은 남서쪽에 위치한 부남곶을 통과하는 북위 33° 12' 위도선을 기준으로 외양쪽은 0.2mmol/m<sup>3</sup>(=0.006mg/ℓ)이하의 분포를 보여 1급수(=0.007mg/ℓ 이하)를 나타내고 있어서 Fig. 4에서 제시한 현재의 분포와 동일하지만, 연안쪽은 0.2mmol/m<sup>3</sup>(=0.006mg/ℓ)이상의 분포를 보여 2급수(=0.015mg/ℓ 이하)를 유지하고 있다. 그러나, 화순소하천(S1)과 황개천(S3)의 하천수가 유입되는 화순 연안 수역에서는 0.3~0.50mmol/m<sup>3</sup>(=0.016mg/ℓ)의 분포가 나타나고, 하수종말처리장(S4)의 유출수와 증문천(S5)의 하천수가 유입되는 증문관광단지 연안 수역에서는 0.4mmol/m<sup>3</sup>(=0.012mg/ℓ)의 등농도선이 나타나고 있다. 이러한 결과를 Fig. 4에 제시된 현재의 농도 분포와 비교하면, 제주도 남부 해역의 용존무기인을 2급수로 유지하기 위한 환경용량은 현재의 오염부하량의 20배에 해당한다.

### 3.3.4 환경용량

오염부하를 현재 오염부하의 2배에서 30배까지 단계적으로 증가시켜서 모델 해역으로 유입시켰을 경우를 시뮬레이션한 결과를 정리하면, DO의 부하를 현재 상태로 일정하게 유지하고 5개의 항목, 즉 COD, DIP, DIN, POC 및 DOC의 부하를 모두 3배로 증가시킨 경우에는 해역수질 환경기준 항목인 DIN이 현재의 수질등급인 3등급 기준을 겨우

만족시켰으나, 오염부하가 3배를 초과하는 경우에는 3급수의 유지가 불가능한 것으로 예측됨에 따라 화순소하천(S1), 황개천(S3), 하수종말처리장(S4)의 유출수 및 증문천(S5)의 하천수가 유입되는 증문관광단지 연안수역의 환경용량은 현재 오염부하량의 3배에 해당하는 것으로 산정되었다. 한편 해역수질 환경기준 항목인 COD는 육지 오염부하가 유입되는 연안수역에서 현재의 수질등급인 1등급 기준을 만족하였고, DO를 일정하게 유지하고 5개의 항목, 즉 COD, DIP, DIN, POC 및 DOC를 모두 10배를 초과하는 경우에는 1등급 기준을 만족시킬 수 없는 것으로 예측되었다. 또한 해역수질 환경기준 항목인 DIP는 육지 오염부하가 유입되는 연안수역에서 현재의 수질등급인 2등급 기준을 만족하였으나, DO를 일정하게 유지하고 5개의 항목, 즉 COD, DIP, DIN, POC 및 DOC를 모두 20배를 초과하는 경우에는 2등급 기준을 만족시킬 수 없는 것으로 예측되었다. 따라서 제주도 남부연안해역이 해역수질 환경기준 항목인 COD, DIN 및 DIP를 모두 현재의 수질 등급으로 유지하면서 수용 가능한 오염부하량, 즉 환경용량은 현재 유입부하량의 3배에 해당한다.

## 4. 결론

하천을 포함한 4개의 주요 육지 오염원으로부터 오염부하가 단계적으로 증가되어 해역에 유입되었을 경우, 제주도 남부해역이 해역수질 환경기준에 의한 현재 수질 등급을 유지하면서 수용할 수 있는 오염부하량이 어느 정도인가를 해역수질 환경기준 항목에 대하여 생태계 모델을 이용하여 산정한 결과는 다음과 같다.

1. 육지의 오염부하 유입원이 위치하는 제주도 남부연안해역에서 용존무기질소(DIN)를 현재의 수질 등급인 3등급 기준으로 유지하기 위한 환경용량은 연안해역으로 유입되는 현재 오염부하량의 3배로 산정되었고, 화학적 산소요구량(COD)을 현재의 수질 등급인 1등급 기준으로 유지하기 위한 환경용량은 현재 유입부하량의 10배로 산정되었으며, 용존무기인(DIP)을 현재의 2등급 기준으로 유지하기 위한 환경용량은 현재 유입부하량의 20배로 산정되었다.

2. 제주도 남부연안해역이 화학적 산소요구량(COD), 용존무기질소(DIN) 및 용존무기인(DIP)을 모두 현재의 수질 등급으로 유지하면서 받아들일 수 있는 오염부하량, 즉 환경용량은 현재 유입부하량의 3배에 해당하는 것으로 평가되었다.

## 후 기

본 연구는 1997년도 한국학술진흥재단 (과제번호: KRF-1997-022-H00020)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김광수·박청길·조은일, 1996, "생태계 모델을 이용한 황해의 환경용량 산정", 한국수질보전학회지, 제12권, 제4호, 383-399.
- [2] 김종구·박청길·김광수, 1994, "하계 마산만의 부영양화 제어를 위한 생태계모델의 적용", 한국환경과학회, 제3권, 제3호, 185-195.
- [3] 김종구·박청길·신성교, 1995, "진해만 해역의 하계 부영양화 모델링(I): 생태계모델을 이용한 식물플랑크톤 농도 분포 시뮬레이션", 대한환경공학회지, 제17권, 제2호, 121-135.
- [4] 서귀포시, 1993, "서귀포시(중문) 하수종말처리장 건설사업 환경영향평가서", 134-157.
- [5] 최우정·박청길·이석모, 1994, "진해만의 빈산소 수괴 형성에 관한 수치실험", 한국수산학회, 제27권, 제4호, 413-433.
- [6] 西村肇, 1997, "環境容量の概念について", 海洋科學, 通卷87號, Vol. 9, No. 1, 42-45.
- [7] 藏本武明·中田喜三郎, 1991, "東京灣における流動と底層DO濃度シミュレーション", 沿岸海洋研究ノート, 第28卷, 第2號, 140-151.
- [8] 通商産業省, 1986, "富營養化水質汚染豫測手法開發事業", 資源環境技術總合研究所.
- [9] Choi, B. H., 1980, "A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea", KORDI, rep. 80-02.
- [10] Jorgensen, S.E., 1979, "Handbook of environmental data and ecological parameters", Pergamon press.
- [11] Strickland, J. D. H. and T. R. Parsons, 1972, "A Practical handbook of seawater analysis", 2nd Ed..