

碩士學位論文

물질순환모델을 이용한 제주항의
수질시뮬레이션



濟州大學校 大學院

環境工學科

康起鳳

2002年12月

물질순환모델을 이용한 제주항의 수질시물레이션

指導教授 趙 恩 一

康 起 鳳

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함



康起鳳의 工學碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 許 木 印

委 員 許 喆 九 印

委 員 趙 恩 一 印

濟州大學校 大學院

2002 年 12 月

Water quality simulation of Jeju harbor
using material cycle model

Ki-Bong Kang

(Supervised by professor Eun-Il Cho)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirement for the degree of Master of Engineering

2002 . 12 .

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Mock Huh, Prof. of Environmental engineering
Thesis director, Chul-Goo Hu, Prof. of Environmental engineering
Thesis director, Eun-Il Cho , Prof. of Environmental engineering

December. 2002

Department of Environmental Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

Summary	1
I. 서론	3
II. 물질순환모델	5
1. 물질순환모델의 개요	5
2. 해수유동모델	7
2.1 개 요	7
2.2 기본 방정식의 전체 조건	7
2.3 기본 방정식	10
2.4 경계조건	12
2.5 수치계산	14
3. 생태계 모델	17
3.1 개 요	17
3.2 생물과정의 수식화	19
3.3 생물 parameter	23
III. 재료 및 방법	26
1. 대상해역 및 현황조사	26
2. 해수유동모델의 적용	28
2.1 모델영역 및 입력자료	28
2.2 조석류 시물레이션	28
2.3 잔차류 시물레이션	29

3. 생태계모델의 적용	31
3.1 생태계모델의 입력자료	31
3.2 수질현황 시뮬레이션	34
3.3 제주항의 수질시뮬레이션	34
IV. 결과 및 고찰	38
1. 수질현황	38
1.1 수질특성	38
1.2 부영양도 평가 및 N/P비	46
2. 해수유동시뮬레이션	48
2.1 조석류 시뮬레이션	48
2.2 잔차류 시뮬레이션	49
3. 생태계시뮬레이션	53
3.1 수질현황 시뮬레이션	53
3.2 모델의 적용가능성 검토	54
4. 제주항의 수질시뮬레이션	59
4.1 하천오염부하의 정량적관리	59
4.2 저질용출부하의 정량적관리	62
4.3 수질 및 저질관리	64
V. 결론	68
VI. 참고문헌	70

List of Figures

Fig. 1. The schematic diagram of the model cycle	6
Fig. 2. Cartesian coordinate for a three-dimensional hydrodynamic model	9
Fig. 3. The location of variables on the vertical grid of a three-dimensional hydrodynamic model	9
Fig. 4. The relative position of variables in the cell of model	15
Fig. 5. The flowchart of numerical calculation in a three-dimensional hydrodynamic model	16
Fig. 6. The schematic diagram for the cycle of nutrients(N and P) in the marine ecosystem	18
Fig. 7. Location of the sampling stations in the Jeju Harbor	27
Fig. 8. The finite-difference grid of the three-dimensional model in the Jeju Harbor	29
Fig. 9. Monthly variations of COD(mg/L) at each stations	42
Fig. 10. Monthly variations of DIN(μ g-at/L) at each stations	43
Fig. 11. Monthly variations of DIP(μ g-at/L) at each stations	44
Fig. 12. Comparison of tidal current between computed and observed results	48
Fig. 13. Distribution of computed tidal currents during the Flood tide	50
Fig. 14. Distribution of computed tidal currents during the Ebb tide	51
Fig. 15. Distribution of computed residual currents in Jeju Harbor	52
Fig. 16. The distribution of the simulated COD in Jeju Harbor	55
Fig. 17. The distribution of the simulated DIN in Jeju Harbor	56
Fig. 18. The distribution of the simulated DIP in Jeju Harbor	57
Fig. 19. Comparisons between computed and observed water quality	58
Fig. 20. The predictions of COD depending on pollutant loads reduction from the river under the present condition.	60

Fig. 21. The predictions of DIP and DIN depending on various nutrient loads reduction from the river under the present condition	61
Fig. 22. The predictions of DIP and DIN depending on various sediment flux rate under the present condition	63
Fig. 23. The predictions of COD depending on pollutant loads reduction in the model area under the present condition	65
Fig. 24. The predictions of DIP and DIN depending on pollutant loads reduction in the model area under the present condition	67



List of Tables

Table 1. The compartments of an ecosystem model	17
Table 2. The biological parameters used in an ecosystem model	22
Table 3. Input data for a hydrodynamic model	30
Table 4. Input data for ecosystem model	35
Table 5. Monthly variation of pollutant loads discharged into Jeju Harbor	35
Table 6. The biological parameters in an ecosystem model for the Jeju Harbor	36
Table 7. Range and mean values of water quality in Jeju harbor	45
Table 8. Eutrophication index and N/P ratio at each month in study area	47



Summary

This study investigated characteristics of water quality and pollutant loads discharged into Jeju Harbor. The distributions of residual currents, COD, dissolved inorganic nitrogen(DIN) and dissolved inorganic phosphorus(DIP) concentration were reasonably reproduced by simulations on the model area of the Jeju Harbor using a material cycle model which is composed of the three-dimensional hydrodynamic model of water flow and ecosystem model for the simulation of water quality. The alternative of improving the water quality of the area is to evaluate quantitatively the concentration of COD, DIN and DIP which are com from pollution load reductions from pollution sources. The results through which a plan can be made to improve the water quality are as below:

The field surveys and water quality analyses were conducted over the Jeju harbor in August and November, 2000 and in February and May, 2001. The results showed the concentration of COD, DIN and DIP were in the range of 1.0 0~4.85mg/L(mean 2.15mg/L), 0.52~4.00 μ g-at/L(mean 1.18 μ g-at/L) and 2.14~74.0 μ g-at/L(mean 12.20 μ g-at/L) respectively, which were exceeding three grade of seawater quality standard. The nitrogen ratio to the phosphorus was lower than 16. Therefore, Nitrogen was playing an important role in phytoplankton growth as limiting factor in study area.

As the results of three-dimensional hydrodynamic simulation, The results of computed tidal currents at three levels obtained by M₂ tide on a three-dimensional hydrodynamic model and observation show that the model can produce realistic results of current in the harbor. The computed tidal current are mainly toward the mouth of a harbor during the flood tide, and being in the opposite direction the ebb tide. The current pattern between surface and bottom are a little different for the current velocity, the surface is about 30cm/sec and the bottom is about

10cm/sec. The computed residual currents showed the counter-clockwise water circulation to exit at the mouth and center of a harbor. Density driven currents were generated northern at surface and southern at the bottom in jeju harbor which the fresh water are flowing into.

The ecosystem model was calibrated with the biological parameters and the data surveyed in the field of the study area in annual average. The simulated results of COD, DIN and DIP were good coincided with the observed values within relative errors (R.E.) and coefficient of determination(r^2). In the case of COD, relative errors (R.E.)of 22.2%, coefficient of determination(r^2) of 0.901. In the case of DIN, relative errors (R.E.)of 17.2%, coefficient of determination(r^2) of 0.976. In the case of DIP, relative errors (R.E.)of 27.1%, coefficient of determination(r^2) of 0.806.

The simulations of COD, DIN and DIP concentrations were performed using ecosystem model under the conditions of 20~100% pollution load reductions from pollution sources. In case of the 100% reduction of the input loads from fresh water, concentration of COD, DIN and DIP were reduced to 39%, 78% and 52% at study area which the fresh water are flowing into respectively, but not much at the center of Jeju harbor. In contrast, in case of the pollution load reductions from sediment, the effect of DIN and DIP reduction relatively seemed to increase around the center of study area. The 95% reduction of the pollution loads from river and sediment is necessary to meet the COD and nutrients concentration of second grade of ocean water quality criteria.

I. 서론

제주항은 제주도의 주요 항만으로 북부 중앙에 위치하고 있으며, 항만의 경계는 서방과제 침단 1km에서 사라봉 동단과 화북포구 서단 중간을 연결한 선내로서 항내 수면적은 7.904km², 임해지구 면적은 4,404m², 항내 최고수심이 14.3m이고, 조류유속이 강하며 외해와 연결된 개방해역으로 산지천이 항내로 유입하고 있다. 제주항은 선박 운항으로 발생하는 폐유, 선박생활오수, 화물 부스러기 그리고 주변지역에서 발생하는 미처리된 생활오수 등으로 인해 항내 수질이 악화되고 있는 실정이며 우리나라 환경부에서도 이 들 해역 수질 등급을 III등급으로 정해놓고 있다(환경부, 1996).

제주 연안 해역의 우수한 자연조건과 풍부한 자원을 지속적으로 이용하기 위해서는 자정능력에 근거한 합리적인 해양환경관리가 필요하며 연안역의 수질관리나 해양자원과 현황의 변동예측, 생물생산량관리 그리고 환경수용력의 파악, 매립, 적조 등에 관계되는 환경보전을 위한 수단으로 최근에는 수질·생태계모델이 많이 이용되고 있다(堀江, 1990). 해역의 수질을 정량적으로 관리하기 위해서는 수질조사 자료에 근거한 수질 시뮬레이션을 통하여 장래의 수질을 예측할 수 있고 대상해역의 환경용량을 파악함으로써 해역의 자정능력에 적합한 수질관리 방안을 도출할 수 있다. 생태계에 부정적인 영향을 주지 않고 수용할 수 있는 최대의 오염부하량을 환경용량이라 정의하며, 이러한 환경용량은 환경의 확산 자정능력에서 유래하므로 수식화를 통해 예측 가능하며(西村, 1976) 또한 수식화를 통한 수질예측에 있어서 수치모델은 유용한 도구로 활용되고 있다(中田, 1991).

연안해역의 수질관리를 위해서는 그 해역에서 일어나는 이류와 확산현상을 포함하는 물리적인 유동장을 파악하고 생태계 구성요소의 흐름을 수식화하여 수질을 예측하는 부영양화모델(Boss *et al*, 1988; Lung, 1988; Takeshi, 1988; Mark and Bunch, 1992) 및 3차원 수치모델(Leendertse and Liu, 1977; 堀口 등, 1977; 中田 등, 1985; Hayter and Pakala, 1989)이 유용한 도구로 이용되고 있다. 물질순환모델은 일반적으로 해양의 수질예측에 많이 사용되는 부영양화모델의 하나로 생물체와 무생물체를 일괄하여 무기물질과 유기물질로 나누고 이들 상호간의 물질흐름을 취급하여 영양염류

와 COD의 거동을 파악할 수 있으며, 물질순환모델은 해수의 유동특성을 시뮬레이션할 수 있는 해수유동모델과 비보존성 물질에 대한 수질을 시뮬레이션하기 위한 생태계모델로 구성되어 있다.

해역의 수질 예측에 관련된 국내의 연구를 살펴보면, 최(1993)가 3차원 물질 순환모델을 이용하여 진해만에서의 빈산소 수괴예측에 관하여 연구한바 있고, 김(1994)이 생태계모델을 이용하여 영양염류 부하량에 따른 식물플랑크톤 농도를 예측하고 부영양화 억제를 위한 방안을 제시한 바 있으며, 조(1996)는 생태계 모델을 이용하여 가막만의 어장환경용량을 산정하였다. 최근에 이(2000)는 낙동강 유입부하의 변동에 따른 식물플랑크톤 극대역의 변동을 시뮬레이션하여 적조의 확산과 예측가능성을 고찰하였고 황해에서 생태계모델을 이용하여 부영양화 현상의 저감에 영향을 미치는 인자를 김(1999)이 평가하였으며, 새만금 사업지구의 연안해역 수질관리를 위하여 오염부하가 해역의 수질관리에 미치는 영향을 김(2002)이 정량적으로 평가하였다.

제주항과 그 주변해역에 관한 연구를 살펴보면, 양(1999)이 산지천을 포함한 제주항 부근의 해양수리학적 특성을 평가하였으며 김(1998)은 제주도 북부연안해역의 해황과 조석전선 특성과 제주해협의 해수유동특성에 관하여 연구하였고, 조(1998)등의 제주도 항만의 수질특성에 대한 조사 및 하천오염부하량 산정에 관한 연구가 진행되었으며 생태계모델을 이용하여 김(2000)이 제주 남부연안해역에서 오염부하량 증가에 의한 환경용량 산정에 적용하였다. 그러나 제주도내의 항만에 대한 환경용량을 통한 정량적인 수질관리에 관한 연구는 전무한 실정이며 물질순환모델을 이용한 실례도 없는 실정이다.

따라서 본 연구는 제주도내 주요항만인 제주항을 대상으로 제주항내 수질시뮬레이션을 하기 위하여 육상으로부터 유입되는 오염부하량을 조사하고 그로인해 변화하는 해역수질을 현장에서 조사하였다. 그리고 수질시뮬레이션을 하기 위하여 해수유동특성을 파악하기 위한 3차원 해수유동모델과, 비보존성 물질에 대한 분포를 시뮬레이션하기 위한 생태계모델로 구성된 물질순환모델을 적용하였으며, 여기서 시뮬레이션된 결과를 이용하여 본 모델의 제주항 적용 가능성을 검토한 후 제주항내 수질오염을 유발할 수 있는 외부부하인 하천오염부하와 내부부하인 저질용출부하를 이용하여 제주항 수질개선을 위한 저감량을 산정하는 것이 본 연구의 목적이며 본 연구결과는 제주항의 해역수질관리를 위한 정량적인 기초자료로 제공될 수 있을 것이다.

II. 물질순환모델

1. 물질순환모델의 개요

연안역에서 오염물질의 이동확산은 매우 복잡하고, 바람에 의한 취송류와 염분 또는 온도차에 의한 밀도류 및 성층이 존재하는 경우가 많다. 비보존성 오염물질에 대한 수질 예측은 수괴 내에서의 복잡한 생·화학적 반응 즉, 생성, 파괴, 침강, 제거 등의 기작을 표현하여야 하며 부영양화 등의 수질현상을 반영하기 위해서는 해역 내에서 식물플랑크톤의 광합성을 규정하는 질소 및 인의 순환을 거시적으로 표현할 수 있는 모델을 선정할 필요가 있다. 따라서 해역의 수질시물레이션을 하기 위해서는 3차원으로 수직변화를 가지며 생태계내 상태함수의 특성을 나타낼 수 있는 물질순환모델을 선정할 필요가 있다.

본 연구에 적용한 물질순환모델(Material cycle model)은 해수유동 시물레이션을 위한 다층모델(Multi-level model : COSMOS)과 수질 시물레이션을 위한 생태계 모델(Ecosystem model : EUTROP2)로 구성되어 있다. 물질순환모델을 시물레이션 하기 위해서는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 우선 해수유동현상을 파악하여야 하고 계산된 해수 유동 결과를 생태계 모델에 입력하고 시물레이션하여 수질을 예측할 수 있다.

연안해역에서 모든 물질의 분산이나 생물의 이동·확산을 예측하려면 우선 기본적인 물리요소인 유동, 수온·염분의 분포를 정량적으로 시물레이션하는 수치모델의 개발이 필요하다. 해역에서의 물질의 이동은 오염물질 투입초기에는 조류와 조류의 수평연적 점성과 직각방향의 난류확산에 의해 분포되지만 그 이후에는 물질의 분산이 흐름의 향류성분에 의존하는 부분이 크기 때문에 조석류뿐만 아니라 조류운동의 비선형성에 기인하는 조석잔차류와 해면가열, 하천수유입, 난수괴의 침입 등에 기인하는 밀도류, 해면상의 바람응력에 의해서 구동되는 취송류 등의 향류성분을 고려할 수 있는 모델로서 밀도의 확산과정을 포함하고 있는 다층모델을 선정할 필요가 있다(柳, 1989).

3차원 해수유동을 시뮬레이션하기 위한 유동모델은 해수의 연직운동을 내부경계면을 고정해서 면을 통과하는 연직류로 표현하는 level model이고, Multi-level model은 어느 정도 상하층의 밀도차가 없는 해역에 적합하다(堀江, 1983). 수층별 수질을 시뮬레이션하기 위한 생태계모델은 영양염의 순환을 중심으로 유기물질을 더욱 세분화해서 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, POC, DOC, DIN, DIP를 고려하고 있으며 이들 성분에 관계된 많은 생물·화학적 요소와 상호작용에 의한 내부생산, 분해, 침강 및 용출 등에 관한 역학적 과정과 파라메타가 규명되어 있는 기존의 생태학적 지식을 종합하여 시스템 공학적인 방법으로 해석하는 방법이다.

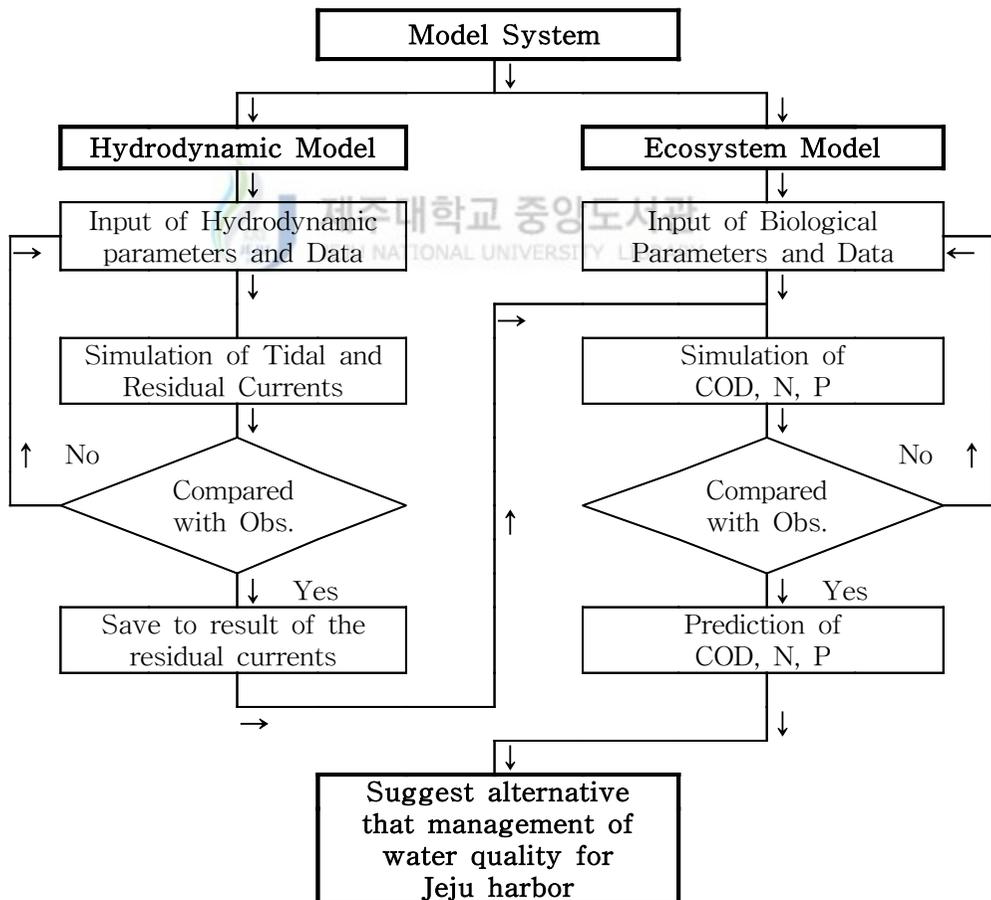


Fig. 1. The schematic diagram of the model cycle.

2. 해수유동모델

2.1 개 요

이 모델은 조석의 침입하는 내만에서 밀도류계의 3차원 해석을 행할 수 있고 생태계 모델을 위한 유동장의 모델로도 이용할 수 있다(中田 등, 1985).

해류, 조류, 난수괴에 의한 부력, 하천수유입에 의한 부력, 해면 가열 또는 냉각에 의한 부력, 해면상에 작용하는 풍응력 등 여러 가지 외력과 灣口幅/灣長으로 표현되는 연안해역의 개방도, 해역의 크기, 수심, 연안·해저의 지형 등 해역이 가지는 고유의 특성 등 다양한 요소가 해수유동에 관련되어 있어서 연안해역의 유동은 매우 복잡하다(柳, 1989).

해양의 유동현상은 시·공간상 규모에 따라서 여러 과정이 포함되며 시·공간규모에 따라 예측 및 해석 방법에 차이가 있다. 일반적으로 연안에서는 조석의 침입, 담수의 유입, 해상풍, 해면을 통한 열교환 또는 외양수의 유입 등 여러 요인이 상호작용으로 해수의 유동에 영향을 미치고, 시·공간적으로 끊임없이 변동하는 복잡한 난류장이 형성되고 있다.

해양의 유동과정에 대해서는 이미 확립된 유체역학의 이론이 있고, 흐름의 운동을 기술하는 미분방정식을 수치적으로 해석하는 방법으로 예측하고 있다. 따라서 복잡한 해수의 유동을 정확히 예측하기 위해서 조석이나 바람에 기인하는 해수면 변화(외부 요인)와 담수유입 등 영향으로 생기는 해수의 밀도변화(내부요인)의 영향을 중시하고 흐름에 대한 이런 요인의 효과를 3차원적으로 취급한다.

2.2 기본방정식의 전제조건

수치 모델은 내만 및 하구에서 유체의 운동을 정식화한 운동방정식, 연속방정식, 조위의 변화를 정식화한 방정식, 염소량 확산 방정식, 열(수온)의 확산 방정식 및 해수의 밀도와 염소량, 수온과의 관계를 정식화한 상태방정식으로 구성된다. 모델을 정식화하기 위한 좌표계는 Fig. 2에 나타내었고, 평균해면 상에 x - y 를 취하고 연직상향에 z 축을 가지고 있다. 기초방정식을 표현하기 위한 기본적인 제안 조건은 다음과 같다.

- 1) 유체의 흐름을 구동하는 요인은 조석, 밀도경사, 연안에서의 하천수의 유입 및 해상으로 부는 바람의 응력이다.
- 2) 유체는 회전지구 상의 점성 비압축성 유체로 취급한다.
- 3) 지구의 회전효과를 나타내는 코리올리 인자는 계산영역 전체에서 일정하다 (f-평균근사).
- 4) 연직방향으로는 정역학 평형을 가정하고, 운동은 무시한다. 즉, 중력가속도와 압력경사가 정적으로 균형을 가진다고 본다.
- 5) 해면상의 열 flux는 흡수일사량, 장파반사량, 해면상의 현열운송량 및 잠열운송량의 수지로서 수식화한다.
- 6) 밀도의 수온 및 염소량에 대한 관계식(상태방정식)으로서는 Knudsen의 식을 이용한다.
- 7) 연직방향의 층 구분과 변수의 위치는 Fig. 3과 같고 각 층내에서 유속, 온도, 염소량 등에 대한 평균화된 상태량을 계산한다.



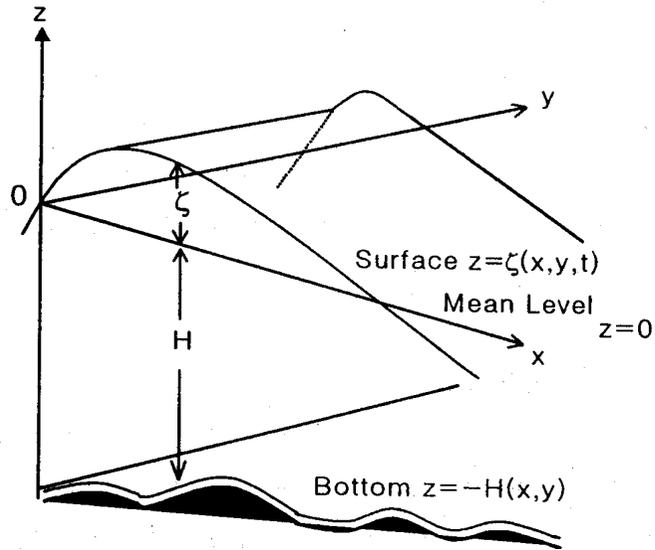


Fig. 2. Cartesian coordinate for a three-dimensional hydrodynamic model.

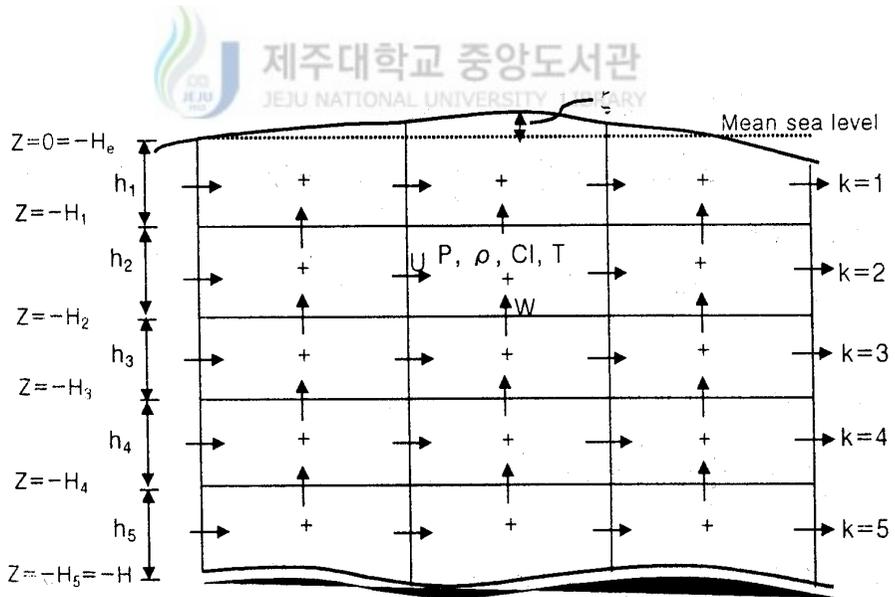


Fig. 3. The location of variables on the vertical grid of a three-dimensional hydrodynamic model.

2.3 기본방정식

유체의 운동에 대한 기본방정식은 운동방정식, 연속방정식, 자유표면 방정식, 열소량 수지식, 열 수지식 및 해수의 밀도를 열소량과 수온과의 관계로 표현한 상태방정식으로 구성된다.

1) x-방향의 운동방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(u^2) - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) + f_o v \\ & - g \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \int_x^0 \frac{\partial \rho}{\partial x} dz' - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x}(N_x \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(N_y \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(N_z \frac{\partial u}{\partial z}) \end{aligned}$$

2) y-방향의 운동방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(uv) - \frac{\partial}{\partial y}(v^2) - \frac{\partial}{\partial z}(vw) - f_o u \\ & - g \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{g}{\rho} \int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial y} dz' - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x}(N_x \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(N_y \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(N_z \frac{\partial v}{\partial z}) \end{aligned}$$

3) 연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

4) 자유표면(조위) 방정식

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-H}^{\xi} u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-H}^{\xi} v dz \right)$$

5) 열수지 방정식 (온도의 확산방정식)

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(uT) - \frac{\partial}{\partial y}(vT) - \frac{\partial}{\partial z}(wT) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial T}{\partial z}) \end{aligned}$$

6) 염소량 수지방정식 (염소량 확산방정식)

$$\begin{aligned} \frac{\partial Cl}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(u \cdot Cl) - \frac{\partial}{\partial y}(v \cdot Cl) - \frac{\partial}{\partial z}(w \cdot Cl) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}(K_x \cdot \frac{\partial Cl}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \cdot \frac{\partial Cl}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \cdot \frac{\partial Cl}{\partial z}) \end{aligned}$$

7) 상태방정식

$$\rho = \rho (Cl, T)$$

여기서는 Kundsén 식을 사용한다.

$$\sigma = \frac{\sigma_t}{1000} + 1$$

$$\sigma_t = \Sigma_t + (\sigma_0 + 0.1324)\{1 - A_t + B_t(\sigma_0 - 0.1324)\}$$

$$\sigma_0 = -0.069 + 1.4708Cl - 0.001570Cl^2 + 0.0000398Cl^3$$

$$\Sigma_t = \frac{(T - 3.98)^2}{503.570} \cdot \frac{T + 28.30}{T + 67.26}$$

$$A_t = T(4.7869 - 0.098185T + 0.0010843T^2) \times 10^{-3}$$

$$B_t = T(18.030 - 0.8164T + 0.01667T^2) \times 10^{-6}$$

여기서 u, v, w : X, Y, Z방향의 유속성분(cm/sec)

ζ : 평균수면에서 자유표면까지의 높이(cm)

H : 평균수면에서 해저까지의 깊이(cm)

ρ : 유체밀도(g/cm³)

f_0 : 코리올리 인자(sec⁻¹)

g : 중력가속도(cm/sec²)

P_a : 대기압(g/cm²·sec²)

T : 수온(°C)

Cl : 염소량(‰)

N_x, N_y, N_z : x, y, z 방향의 와동점성계수(cm²/sec)

K_x, K_y, K_z : x, y, z 방향의 와동확산계수(cm²/sec)

k_x, k_y, k_z : x, y, z 방향의 열확산계수(cm²/sec)

2.4 경계조건

기초식의 수치계산을 실행해서 요구되는 정도의 수치해를 얻기 위해서는 각 상태량에 대해서 적절한 경계조건을 설정하는 것이 필요하다.

1) 해안선상의 조건 (closed boundary)

해안선을 따라서 경계층 내의 흐름을 고려할 필요가 있는 경우에는 속도성분에 대해서 non-slip 조건, 즉 $V_k=0$ 을 적용하지만, 취급하는 공간규모(grid scale)가 커서 경계층의 해상도가 요구되지 않는 경우에는 free-slip 조건, 즉 $(V_k)_n=0$, $\partial(V_k)_t/\partial n=0$ 을 적용한다. 첨자 n 과 t 는 각각 해안선의 길이방향에 대한 법선, 접선방향의 성분을 나타낸다. 온도 T_k 와 염소량 Cl_k 에 대해서는 육지와 교환을 고려하지 않는다.

$$K \cdot \frac{\partial T_k}{\partial n} = K \cdot \frac{\partial Cl_k}{\partial n} = 0$$

2) 외양의 경계조건 (open boundary)

자유표면 ζ 에는 침입하는 조석파의 파동을 정현함수로서 나타내고, 유속성분 u_k , w_k , v_k 에 대해서는 외부와의 운동량 교환이 자유로 행해지고 있는 자유 유출입의 조건(free-stream condition)으로 한다. 온도 T_k 와 염소량 Cl_k 에 대해서는 상류측 경계의 T_k , Cl_k 를 고정하고(T_k^0 와 Cl_k^0), 하류측 경계에서는 자유유출입(free-stream)을 적용한다.

$$\xi = \xi_0 + \sum_i A_i \cos(w_i t - k)$$

$$\frac{\partial M_k}{\partial n} = \frac{\partial N_k}{\partial n} = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, k)$$

$$K \cdot \frac{\partial T_k}{\partial n} = K \cdot \frac{\partial Cl_k}{\partial n} = 0 \quad (\text{유입측 경계})$$

$$T_k = T_k^0, \quad Cl_k = Cl_k^0 \quad (\text{유출측 경계})$$

3) 자유수면(free surface)상의 점성응력

Bulk공식에 의해 풍응력(wind stress)을 수식화하였다.

$$\frac{1}{\rho} r_x^s = \frac{\rho_a}{\rho} \cdot r_a^2 W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

$$\frac{1}{\rho} r_y^s = \frac{\rho_a}{\rho} \cdot r_a^2 W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

여기서 W_x, W_y : 풍속벡터의 x, y방향의 성분(m/s)

ρ_a : 공기밀도(g/cm³)

v_a^2 : 공기저항계수

4) 해저(bottom)상의 점성응력

Bulk 공식을 이용해서 해저마찰응력을 정식화하였다.

$$\frac{1}{\rho} r_x^b = r_b^2 u_k \sqrt{u_k^2 + v_k^2}$$

$$\frac{1}{\rho} r_y^b = r_b^2 v_k \sqrt{u_k^2 + v_k^2}$$

단 u_k, v_k : 저층(bottom level, k=K)내의 x, y방향의 유속

r_b^2 : 해저마찰계수

5) 층간의 점성응력 (inter-layer shear stresses)

Bulk 공식에 의해서 층간의 마찰응력을 수식화하였다.

$$\frac{1}{\rho} r_x^{k-1, k} = r_i^2 (u_{k-1} - u_k) \sqrt{(u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k)^2}$$

$$\frac{1}{\rho} r_y^{k-1, k} = r_i^2 (v_{k-1} - v_k) \sqrt{(u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k)^2}$$

여기서 v_i^2 은 층간마찰계수이다.

6) 해면과 대기간의 열수지

열수지식(온도의 확산방정식)의 각 Bulk공식 중 열원을 식 중에 포함하는 것은 표층(k=1)에 있고 그 외 level은 연직유속에 의한 이류와 연직방향의 와동확산에 의해서 열(온도)이 전달된다. 여기서는 표층에 있어 열원의 항 $Q/C_v \rho$ 를 계산하는 방식이다.

해면과 대기간의 열수지 요소에는 해면을 따뜻하게 하는 과정으로서 일사에 의한 단파방사와 대기에서의 장파방사가 있고, 해면을 냉각하는 과정으로는 해면에서의 장파역방사, 물의 증발에 의한 잠열 및 접수 기층내의 난류열수송이 있다.

열수지 요소 중에서 해면으로 흡수된 단파방사는 해면의 물리적 조건과는 무관하게 위도, 계절, 일사 및 운량에 의해서 결정되는 것이다. 일단 수면으로부터 장파역방사는 수온에 의해서 결정되는 독립항이다. 그러나 그 외의 요소는 수온, 접수대기의 수온, 습도, 풍속 및 운량 등에 의해서 지배된다.

해면에 있어 열 flux는 (1) 흡수일사량, Q_s (2) 유효장파방사량(해면에서 대기로 향해서 사출된 역방사와 대기로부터 입사한 방사와의 차이분), Q_b (3) 해면과 대기의 난류 열전달량(현열수송량), Q_c (4) 물의 상변화에 따른 잠열량(증발의 경우는 열방출, 응결의 경우는 열공급), Q_e 로서 다음 식으로 표현된다.

$$Q = Q_s - (Q_b + Q_c + Q_e)$$

2.5 수치계산



다층모델의 기초식을 유한차분근사에 의해서 수치계산을 행한다. 그리고 계산영역을 x, y, z 방향 각각에서 I, J, K 본의 격자선을 사용해서 직방체의 mesh(cell)로 분할한다. $x=i, y=j, z=k$ 의 격자좌표에 의해서 식별되는 직방체의 각변의 길이를 각각 $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ 로 한다(Variable mesh). 또 이 격자좌표계에 있어서 상태량의 배치는 Fig. 4에 표현한 방식으로 한다.

유속성분 u, v, w 는 cell의 면상에, 온도 T , 염소량 Cl , 밀도 ρ , 및 압력 P 는 cell의 center에 각각 배치해 둔다(spatial staggered scheme). 또한 parameter $N_x, N_y, N_z, K_x, K_y, K_z$ 등에 대해서는 대응하는 상태량과 정의점을 동일하게 한다. 수치계산 순서도는 Fig. 5에 나타내었다.

차분 scheme은 이류항에 upstream scheme을 이용한 primitive scheme(explicit scheme)을 이용하였으며 기본적으로는 시간, 공간 모두 중앙차분 scheme으로 하였다.

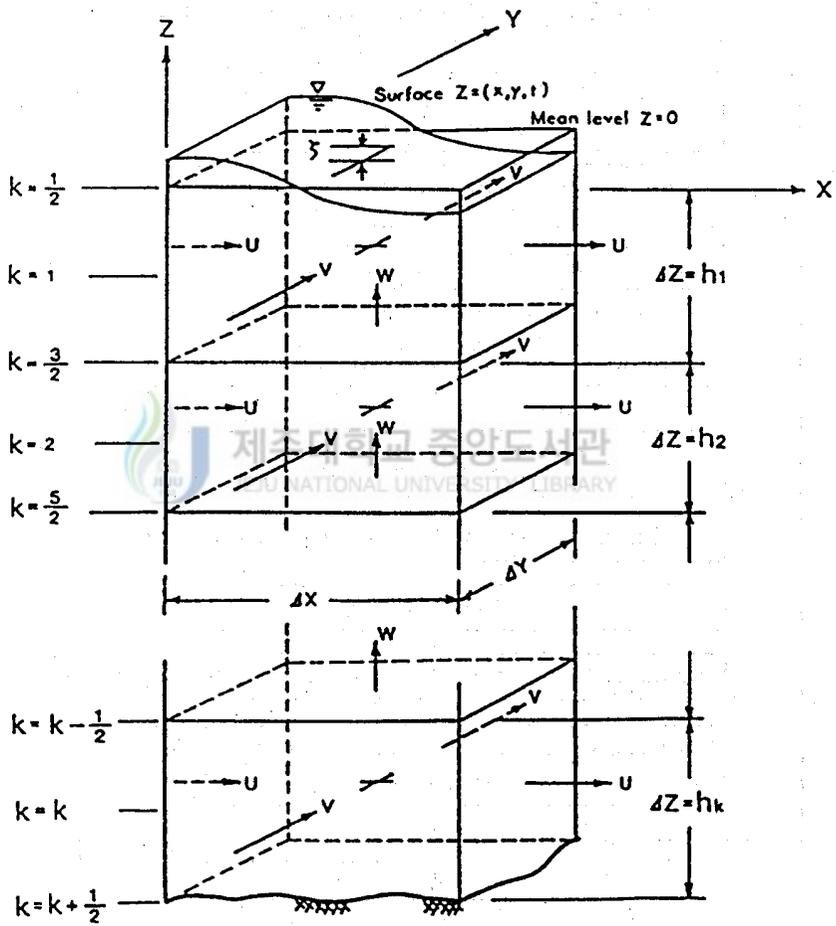


Fig. 4. The relative position of variables in the cell of model.

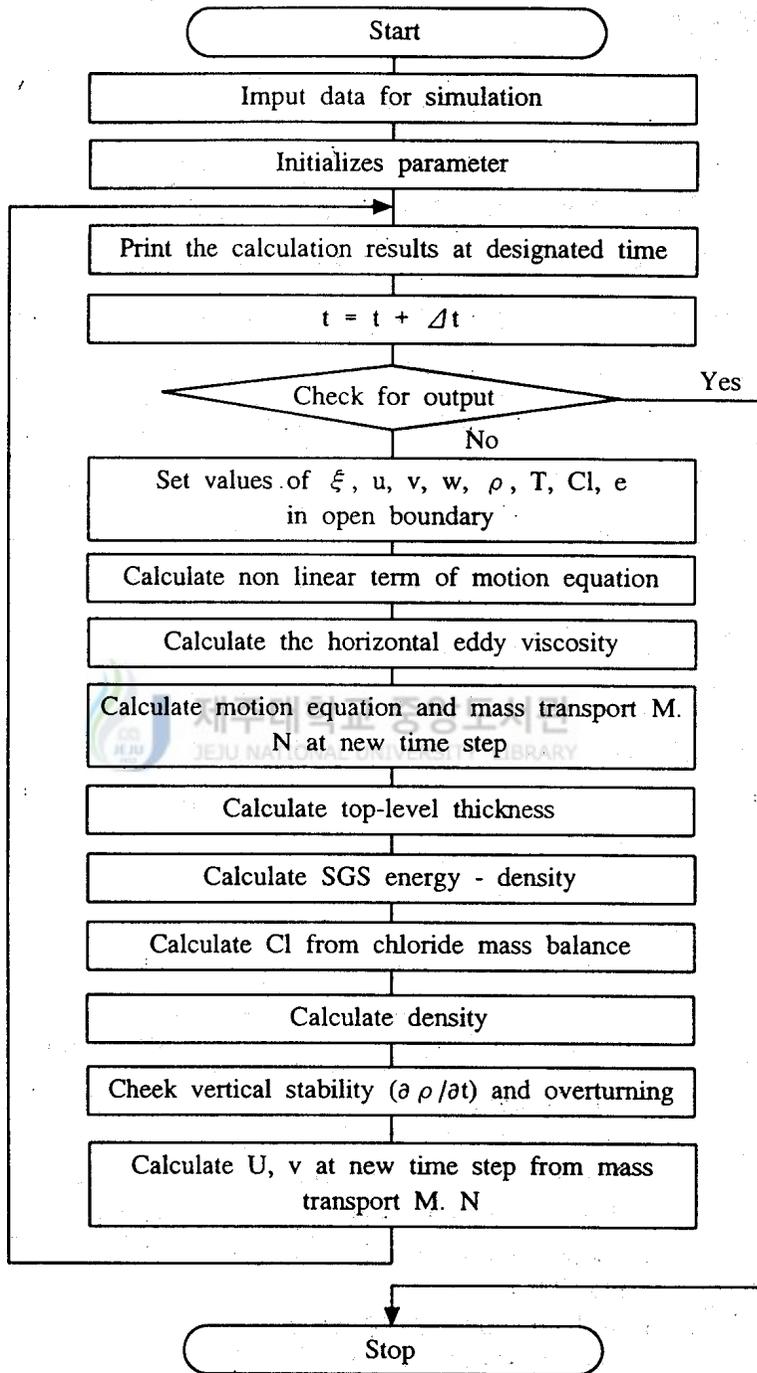


Fig. 5. The flowchart of numerical calculation in a three-dimensional hydrodynamic model.

3. 생태계모델

3.1 개요

저차생산자의 계만을 대상으로한 연안 해양생태계내 물질순환으로서 탄소와 질소 및 인의 흐름은 Fig. 6에 나타내었다. 생태계 모델로는 기존의 생태학 연구로부터 알고 있는 내용을 총괄하여 시스템 공학적인 방법으로 물질순환을 수치적으로 해석한 것이다. 모델은 생태계내 물질의 보존을 나타내는 미분방정식으로 구성되어 있지만, 순환 경로의 하나하나가 실험이나 관측사실로부터 유도된 경험에 따르고 있고, 메카니즘은 있어도 유체역학 모델과 같은 물리법칙에 근거한 모델과는 성격이 다르다. 생태계의 구성 요소로서 4개의 유기물질 요소, 2개의 무기물질 요소 및 2개의 수질 요소가 있는데, 유기물질의 구성 요소에는 식물플랑크톤(P), 동물플랑크톤(Z), 입자성 유기물(detritus, POM) 및 용존성 유기물(DOM)이 있고 무기물질의 구성 요소에는 인산인(DIP)과 용존무기질소(DIN)가 있으며 수질의 구성 요소로서 용존산소(DO)와 화학적 산소요구량(COD)이 정의되어 있다. 저생생물이나 퇴적물 등으로 이루어진 해저계도 환경인자로서 취급하여 모델의 변수로 되어 있다. Table 1에 생태계 모델에 사용한 구성 요소를 나타내었다.

Table 1. The compartments of an ecosystem model

	Compartment	Abbreviation	Unit
Organic material	Phytoplankton	P	mgC/m ³
	Zooplankton	Z	mgC/m ³
	Particulate organic material	POC	mgC/m ³
	Dissolved organic material	DOC	mgC/m ³
Inorganic material	Dissolved inorganic phosphorus	DIP	μg-at/L
	Dissolved inorganic nitrogen (NH ₄ ⁺ + NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻)	DIN	μg-at/L
DO	Dissolved oxygen	DO	mg/L
Water Quality	Chemical oxygen demand	COD	mg/L

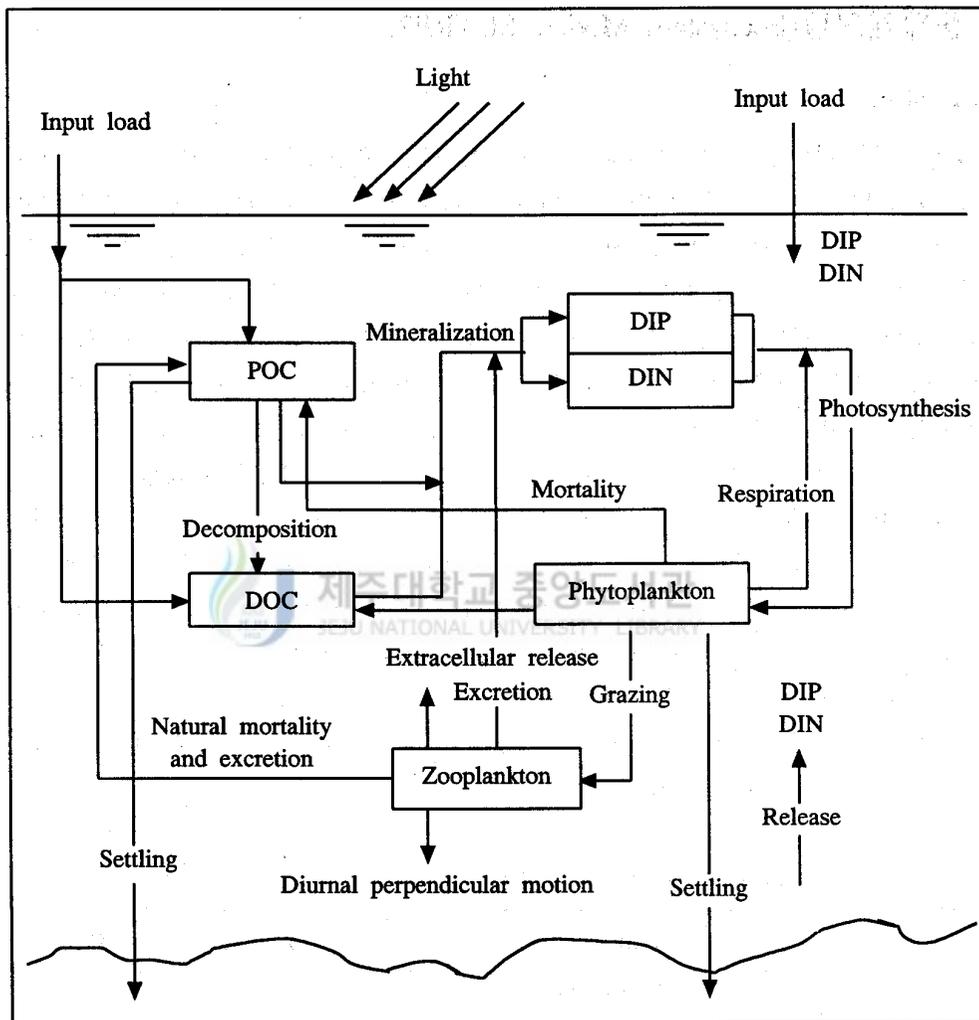


Fig. 6. The schematic diagram for the cycle of nutrients(N and P) in the marine ecosystem.

해역의 임의의 지점에 있어 구성 요소의 현존량 B의 시간에 따른 농도변화를 기술한 방정식은 다음과 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial t} &= \text{이류} + \text{확산} + \text{생물·화학적 변화량} \\ &= -u \frac{\partial B}{\partial x} - v \frac{\partial B}{\partial y} - w \frac{\partial B}{\partial z} \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial B}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial B}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial B}{\partial z} \right] \\ &\quad + \frac{\partial B}{\partial t} \end{aligned}$$

여기서, B = 구성 요소의 현존량

t = 시간

u, v, w = x, y, z방향의 유속성분

Kx, Ky, Kz = x, y, z방향의 와동확산계수

$\partial B / \partial t$ = 모든 생물·화학적 과정에 의한 단위시간당 구성 요소의 변화량

상기의 확산방정식에는 만내 흐름에 의한 물질수송(이류)을 계산함에 있어 생태계 모델은 다층유동모델과 연결되어 있다. 유동모델의 시뮬레이션에서 계산된 유속성분 (u, v, w)을 생태계 모델에 입력하여 각 구성 요소의 현존량이 시간적, 공간적인 변화에 따라 예측된다.

3.2 생물과정의 수식화

1) 식물플랑크톤 구성 요소 (P ; mgC/m³)

식물플랑크톤의 구성 요소로서 수역 내의 우점종에 대한 평균적인 단일종 군집을 고려한다. 명백한 종의 천이가 관찰된 수역에서는 복수의 그룹을 고찰하고 각각 다른 체내 영양소 조성이나 온도, 광, 영양염으로의 응답양식을 고찰하는 것이 필요하고, 종간 경쟁의 문제에 대한 생물변수를 선택할 때에 불확실한 요인이 많기 때문에 가능

한 한 간단하게 모델화하였다. 식물플랑크톤 생물량, $P(\text{mgC}/\text{m}^3)$ 의 시간에 따른 농도변화는 다음과 같이 기술된다.

$$\frac{dP}{dt} = \text{광합성에 의한 증식} - \text{세포외분비} - \text{호흡} \\ - \text{동물플랑크톤에 의한 섭취} - \text{고사} - \text{침강}$$

$$\left(\frac{dP}{dt}\right)^* = \{1 - \mu_3(P)\} \cdot V_1(T) \cdot \mu_1(\text{DIP}, \text{DIN}) \cdot \mu_2(I) \cdot P - V_2(T) \cdot P \\ - V_3(T) \cdot Z - V_4(T) \cdot P - W_p \frac{\partial P}{\partial Z}$$

2) 동물플랑크톤 구성 요소 (Z ; mgC/m^3)

식물플랑크톤 구성 요소와 같이 평균적인 단일 동물플랑크톤 군집을 대상으로 한다. 동물플랑크톤 생물량, Z 의 시간에 따른 농도변화를 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{dZ}{dt} = \text{섭식} - \text{배분} - \text{배설} - \text{자연사망} \pm \text{일주수직이동}$$

$$\left(\frac{dZ}{dt}\right)^* = V_3(T) \cdot Z - (1 - \mu) \cdot V_3(T) \cdot Z - (\mu - \nu) \cdot V_3(T) \cdot Z - V_5(T) \cdot Z \\ = \{\nu \cdot V_3(T) - V_5(T)\} \cdot Z - W_Z(t) \frac{\partial Z}{\partial Z}$$

3) 입자성 유기물 구성 요소 (POC ; mgC/m^3)

본 모델에서 입자성 유기물 구성 요소는 입자상 유기물(detritus)을 의미하며, 탄소량 단위의 POC(mgC/m^3)로 표현된다. 입자상 유기인(POP) 및 입자상 유기질소(PON)에 대해서는 현탁물 중의 C/P, C/N 조성비에 의해 POC로부터 환산된다.

입자성 유기물(POC) 구성 요소의 시간변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d(\text{POC})}{dt} = \text{식물플랑크톤 고사} + \text{동물플랑크톤 배설}$$

+ 동물플랑크톤의 자연사망 - 입자성 유기물의 세균에 의한 분해

- 침강 + 계외로부터의 유입.

$$\frac{d}{dt}(\text{POC})^* = -W_{\text{POC}} \frac{\partial}{\partial Z}(\text{POC}) - V_6(T) \cdot (\text{POC}) + V_4(T) \cdot P \\ + (1 - \mu) \cdot V_3(T) \cdot Z + V_5(T) \cdot Z + q_{\text{poc}}$$

4) 용존성 유기물 구성 요소 (DOC ; mgC/m³)

용존성 유기물(DOM) 구성 요소는 탄소량 단위의 DOC로 표현되며 용존성 유기인 (DOP) 및 용존성 유기질소(DON)는 C/P, C/N 조성비를 이용해서 환산된다. DOC의 시간변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d(\text{DOC})}{dt} = \text{식물플랑크톤의 세포외분열} + \text{입자성 유기물의 분해로 인한 생성}$$

- 용존성 유기물의 무기화 + 계외로부터 유입

$$\frac{d}{dt}(\text{DOC})^* = \mu_3(P) \cdot V_1(T) \cdot \mu_1(\text{DIP}, \text{DIN}) \cdot \mu_2(I) \cdot P \\ + \frac{k}{1+k} V_6(T) \cdot (\text{POC}) - V_7(T) \cdot (\text{DOC}) + q_{\text{DOC}}$$

5) 인산염 구성 요소 (DIP ; μg-at/L)

인산염 PO₄-P (DIP)의 생물과정에 관한 수식화는 다음과 같다.

$$\frac{d(\text{DIP})}{dt} = - \text{식물플랑크톤에 의한 섭취} + \text{식물플랑크톤의 호흡}$$

+ 동물플랑크톤의 배설 + 입자성 유기물의 분해

+ 용존성 유기물의 무기화 + 계외로부터 공급

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (\text{DIP})^* = & - [P:C_P] \cdot V_1(T) \cdot \mu_1(\text{DIP}, \text{DIN}) \cdot \mu_2(I) \cdot P \\ & + [P:C_{\text{POM}}] \frac{1}{1+k} V_6(T) \cdot (\text{POC}) + [P:C_P] \cdot V_2(T) \cdot P \\ & + [P:C_z] (\mu - \nu) \cdot V_3(T) \cdot Z + [P:C_{\text{DOM}}] \cdot V_7(T) \cdot (\text{DOC}) \\ & + q_p \end{aligned}$$

6) 용존무기질소 구성 요소 (DIN ; $\mu\text{g-at/L}$)

용존무기질소(DIN)는 암모니아질소($\text{NH}_4^+\text{-N}$), 아질산질소($\text{NO}_2^-\text{-N}$), 질산질소($\text{NO}_3^-\text{-N}$)의 합이고, 각 형태의 구별은 고려하지 않았다. DIN의 생물과정에 관한 수식화는 다음과 같다.

$$\frac{d(\text{DIN})}{dt} = - \text{식물플랑크톤에 의한 섭취} + \text{식물플랑크톤의 호흡}$$

+ 동물플랑크톤의 배설 + 입자성 유기물의 분해

+ 용존성 유기물의 무기화 + 계외로부터 공급

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (\text{DIN})^* = & - [N:C_P] \cdot V_1(T) \cdot \mu_1(\text{DIP}, \text{DIN}) \cdot \mu_2(I) \cdot P \\ & + [N:C_{\text{POM}}] \frac{1}{1+k} V_6(T) \cdot (\text{POC}) + [N:C_P] \cdot V_2(T) \cdot P \\ & + [N:C_z] \cdot (\mu - \nu) \cdot V_3(T) \cdot Z + [N:C_{\text{DOM}}] \cdot V_7(T) \cdot (\text{DOC}) \\ & + q_N \end{aligned}$$

7) 용존산소 구성 요소 (DO ; mg/L)

용존산소 구성 요소(DO)의 단위시간당 변화량에 관한 수식화는 다음과 같다.

$$\frac{d(\text{DO})}{dt} = \text{광합성에 의한 공급} - \text{식물플랑크톤의 호흡에 의한 소비}$$

- 동물플랑크톤의 호흡에 의한 소비 - 입자성 유기물의 분해에 의한 소비

- 용존성 유기물의 무기화에 의한 소비 - 저니에 의한 산소소비 + 재폭기

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\text{DO})^* = & + [\text{TOD:C}_P] \cdot V_1(T) \cdot \mu_1(\text{DIP, DIN}) \cdot \mu_2(\text{I}) \cdot P + K_a(\text{DO}_S - \text{DO}) \\ & - [\text{TOD:C}_P] \cdot V_2(T) \cdot P - [\text{TOD:C}_Z] \cdot (\mu - \nu) \cdot V_3(T) \cdot Z \\ & - [\text{TOD:C}_{\text{POM}}] \cdot V_6(T) \cdot (\text{POC}) - [\text{TOD:C}_{\text{DOM}}] \cdot V_7(T) \cdot (\text{DOC}) \\ & - [\text{TOD:C}_B] \cdot V_8(T) \cdot D_B \end{aligned}$$

8) 화학적 산소요구량 구성 요소 (COD ; mg/L)

위에서 설명한 각 생물과정의 수식화를 통해서 해역내의 각 형태의 유기물에 대한 단위시간당의 증감량이 구해진다. 즉,

$$\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)^*, \left(\frac{\partial Z}{\partial t}\right)^*, \left(\frac{\partial \text{POC}}{\partial t}\right)^*, \left(\frac{\partial \text{DOC}}{\partial t}\right)^* \text{ 이 유기물 변화량을 나타낸다.}$$

이들은 탄소량으로 나타난 변화량이지만, 용존산소(DO)로 환산하는 것과 같은 방법으로, 이 탄소량을 COD농도로 환산하는 계수를 곱함으로써 COD의 변화량 즉 내부생산량을 평가할 수 있다. 이 환산계수를 각각 [COD:C_P], [COD:C_Z], [COD:C_{POM}], [COD:C_{DOM}]이라고 하면 내부생산량은 다음의 수식화로 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\text{COD})^* = & [\text{COD : C}_P] \left(\frac{dP}{dt}\right)^* + [\text{COD : C}_Z] \left(\frac{dZ}{dt}\right)^* \\ & + [\text{COD : C}_{\text{POM}}] \frac{d}{dt}(\text{POC})^* + [\text{COD : C}_{\text{DOM}}] \frac{d}{dt}(\text{DOC})^* \end{aligned}$$

이들의 환산비를 어떻게 결정할 것인가가 문제이지만, 이 모델에서는 津田 등이 瀬戸内海의 실험에서 얻은 $\text{TOD : COD}_{\text{Acid}} \cong 2.26 : 1$ 의 관계를 사용하여 TOD량으로부터 COD량으로 환산한다.

TOD:탄소비에 관해서는 앞에서 기술한 이론식을 사용하여 알 수 있다.

3.3 생물 parameter

생태계 모델의 수식화에 나타난 생물 parameter의 기호, 정의 및 단위는 Table 2와 같이 정리할 수 있다.

Table 2. The biological parameters used in an ecosystem model

No.	Symbol	Definition	Unit
1	α_1	maximum growth rate of phytoplankton at 0°C	day ⁻¹
2	β_1	temperature coefficient	°C ⁻¹
3	α_2	respiration rate of phytoplankton at 0°C	day ⁻¹
4	β_2	temperature coefficient	°C ⁻¹
5	α_3	maximum grazing rate of zooplankton at 0°C	day ⁻¹
6	β_3	temperature coefficient	°C ⁻¹
7	α_4	death rate of phytoplankton at 0°C	day ⁻¹
8	β_4	temperature coefficient	°C ⁻¹
9	α_5	natural death rate of zooplankton at 0°C	day ⁻¹
10	β_5	temperature coefficient	°C ⁻¹
11	α_6	mineralization rate of POC at 0°C	day ⁻¹
12	β_6	temperature coefficient	°C ⁻¹
13	α_7	mineralization rate of DOC at 0°C	day ⁻¹
14	β_7	temperature coefficient	°C ⁻¹
15	α_8	oxygen consumption rate of sediment at 0°C	day ⁻¹
16	β_8	temperature coefficient	°C ⁻¹
17	K_{SP}	half saturation constant for uptake of $PO_4^{3-}-P$ at 0°C	$\mu g-at/L$
18	K_{SN}	half saturation constant for uptake of DIN at 0°C	$\mu g-at/L$
19	I_{opt}	optimum intensity of radiation for photosynthesis	ly/day
20	I_{max}	maximum intensity of sunlight at sea surface	ly/day
21	D	length of day	day
22	k_0	dissipation coefficient of light independent of Chl.a	m ⁻¹
23	ν	constant of dissipation coefficient depending on Chl.a	m ⁻¹ (mgChl/m ³) ⁻¹
24	k	Ivlev index of zooplankton grazing	(mgC/m ³) ⁻¹
25	P^*	function of grazing	mgC/m ³
26	μ	digestion efficiency of zooplankton	%
27	λ	total growth efficiency of zooplankton	%

Table 2. The biological parameters used in an ecosystem model (continued)

No. Symbol	Definition	Unit
28 κ	percentage of the quantity decomposed from POC to DOC to the quantity mineralized from POC	%
29 K_{DO}^1	half concentration of DO for mineralization of POC	mg/L
30 K_{DO}^2	half concentration of DO for mineralization of DOC	mg/L
31 W_p	settling velocity of phytoplankton	m/day
32 W_{POC}	settling velocity of detritus(POC)	m/day
33 W_Z^1	maximun upward velocity at night for diurnal perpendicular motion of zooplankton	m/day
34 W_Z^2	maximun downward velocity in the daytime for diurnal perpendicular motion of zooplankton	m/day
35 K_a	reaeration coefficient at sea surface	day ⁻¹
36 [P:C _p]	ratio of P/C for phytoplankton	weight ratio
37 [N:C _p]	ratio of N/C for phytoplankton	weight ratio
38 [TOD:C _p]	ratio of TOD/C for phytoplankton	weight ratio
39 [COD:C _p]	ratio of COD/C for phytoplankton	weight ratio
40 [Chl-a:C _p]	ratio of Chl-a/C for phytoplankton	weight ratio
41 [P:C _z]	ratio of P/C for zooplankton	weight ratio
42 [N:C _z]	ratio of N/C for zooplankton	weight ratio
43 [TOD:C _z]	ratio of TOD/C for zooplankton	weight ratio
44 [COD:C _z]	ratio of COD/C for zooplankton	weight ratio
45 [P:C _{POM}]	ratio of P/C for detritus(POC)	weight ratio
46 [N:C _{POM}]	ratio of N/C for detritus(POC)	weight ratio
47 [TOD:C _{POM}]	ratio of TOD/C for detritus(POC)	weight ratio
48 [COD:C _{POM}]	ratio of COD/C for detritus(POC)	weight ratio
49 [P:C _{DOM}]	ratio of P/C for dissolved organic matter(DOC)	weight ratio
50 [N:C _{DOM}]	ratio of N/C for dissolved organic matter(DOC)	weight ratio
51 [TOD:C _{DOM}]	ratio of TOD/C for dissolved organic matter(DOC)	weight ratio
52 [COD:C _{DOM}]	ratio of COD/C for dissolved organic matter(DOC)	weight ratio

Ⅲ. 재료 및 방법

1. 대상해역 및 현황조사

본 연구에 적용한 대상해역은 Fig. 7에 나타낸 제주항을 선정하였다.

연구해역의 현황조사는 육상부하량 조사와 해역수질조사로 나눌 수 있다. 우선 하천의 오염부하량을 측정하기 위해 제주항으로 유입되는 산지천에 대하여 2000년 8월, 11월, 2001년 2월 그리고 5월에 총 4회에 걸쳐 채수하여 분석하였고 제주항의 수질특성을 조사하기 위하여 육상오염부하의 영향을 가장 많이 받는 낙조시를 중심으로 2000년 8월, 11월, 2001년 2월 그리고 5월에 총 4회에 걸쳐 총 5개의 정점에서 반돈채수기를 이용하여 층별(표층(0m), 중층(5m) 그리고 저층(bottom))로 시료를 채수하여 해역수질조사를 행하였고, 제주항 외해역의 수질정도를 비교 조사하기 위하여 제주항 외 1개 정점(St. 6)을 택하여 수질조사를 병행하였다.

수질조사항목과 분석법은 다음과 같으며, 수질오염공정시험법(2001) 및 해양환경공정시험법(1998)에 준하는 시험법으로 행하였다.

- 1) 수온과 염분 : Salinometer로 측정
- 2) pH : pH meter(Orion 290 A)로 현장에서 측정
- 3) 총부유물질(TSS): Whatman GF/C 여과지를 사용하여 여과 건조 후 무게차로 정량하여 계산
- 4) 화학적 산소요구량(COD) : 알칼리성 과망간산 칼륨법으로 정량
- 5) 용존산소(DO) : Winkler-Azide 변법 및 DO meter로 현장에서 측정
- 6) 암모니아성 질소($\text{NH}_4^+\text{-N}$) : Indophenol법에 의한 비색정량
- 7) 질산성 질소($\text{NO}_3^-\text{-N}$) : Cadmium reduction법에 의한 비색정량
- 8) 아질산성 질소($\text{NO}_2^-\text{-N}$) : NED법에 의한 비색정량
- 9) 총무기질소(TIN) : $\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N} + \text{NO}_2^-\text{-N}$
- 10) 인산인($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) : 아스코르빈산법에 의한 비색정량

- 11) 클로로필 a(Chlorophyll a) : Strickland and Parson법에 의한 비색정량
- 12) 입자성 유기탄소(POC) : GF/F filter로 시수 일정량을 여과하여 걸러진 filter를 CHN분석기(MT-2형)를 이용하여 정량
- 13) 용존성 유기탄소(DOC) : GF/F filter로 여과된 시수 여액을 TOC analyzer(TOC-5000A형)를 이용하여 정량

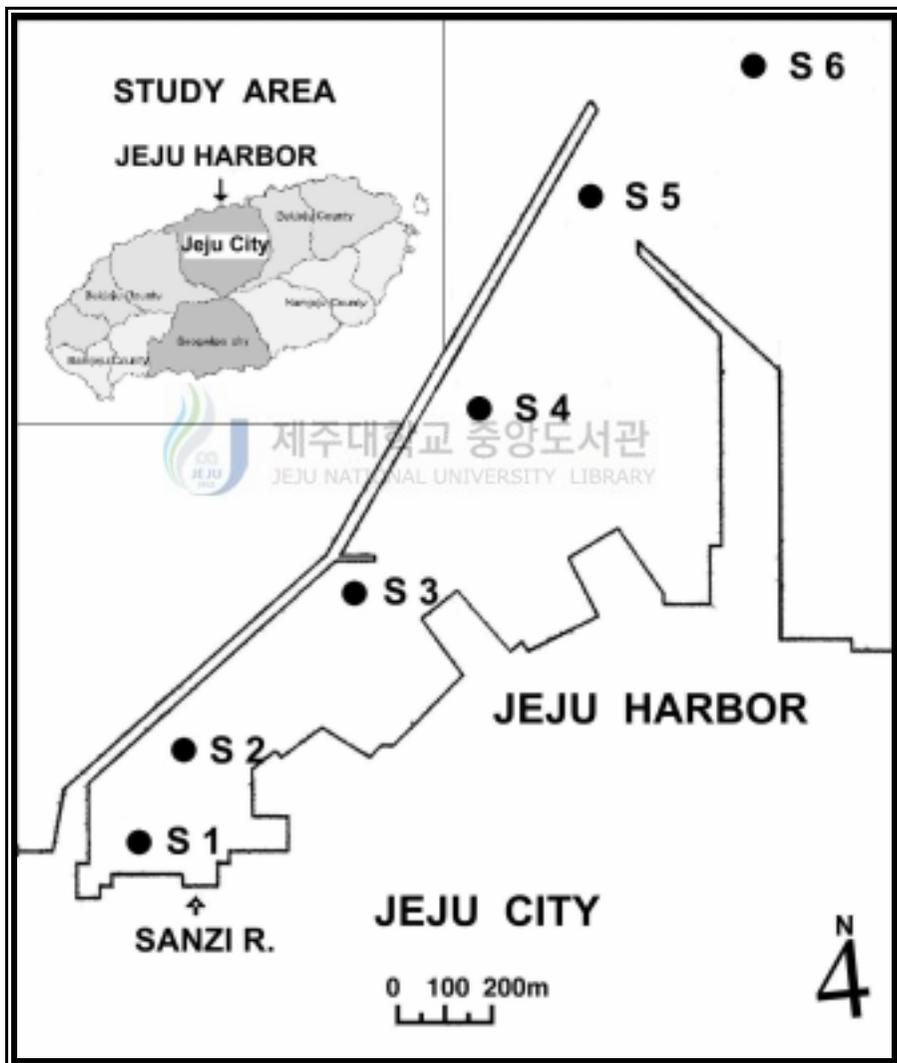


Fig. 7. Location of the sampling stations in the Jeju Harbor.

2. 해수유동모델의 적용

2.1 모델영역 및 입력자료

제주항을 시뮬레이션하기 위해 해수유동모델의 모델영역은 Fig. 8과 같이 산지천 유출수가 해역에 미치는 영향을 비교하기 위해 영역을 설정하였다. 격자는 X방향으로 75개, Y방향으로 89개 Z방향으로는 3층으로 격자망을 구성하고 하나의 격자 크기는 X, Y방향으로 각각 25m로 하였다.

모델영역내의 해수유동을 시뮬레이션하기 위해서 입력자료는 Table 3과 같이 경계에서의 조위는 반일주조성분인 M_2 분조를 평균조석으로 이용하였고, 육상의 하천을 통하여 모델영역내로 유입되는 담수유입원은 산지천을 고려하여 조사 시기에 관측한 유량, 수온, 염소량 등의 연평균자료를 입력하였다.

해저마찰계수는 심해의 최적치로서 일반적으로 해의 안정성을 주는 $R=0.025$ 를 적용하였다(해양연구소, 1989). 수평확산계수는 일본의 경우 대부분 내만에서 $10^3 \sim 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 의 범위로 측정되고 있으며(中村 等, 1989), 국내의 경우는 본 모델을 이용하여 최(1992)가 진해만에서 $3.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 를 적용하였고, 조(1996)가 가막만에서 $1.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$, 김(1999)이 황해에서 $1.0 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 를 적용한 바 있다. 본 모델에서는 x, y방향 수평확산계수를 $1.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 적용하였다. 바람의 영향은 시기별로 풍향과 풍속이 불규칙해서 고려하지 않았다. 총 계산시간은 계산치가 수치적으로 안정을 이루는 20 조석까지 계산하여 해수유동을 시뮬레이션하였다.

2.2 조석류 시뮬레이션

3차원 해수유동모델을 이용하여 제주항에서 우세한 주태음반일조조인 M_2 분조의 조위와 위상을 외해 경계에 취하여 모델영역 안으로 해양조석이 작용하게 하여 조석류의 유동장을 시뮬레이션하였다.

계산된 해수유동의 결과가 실제 관측치와 어느 정도 일치하는 지를 알아보기 위해서 기존 관측점에서의 실측된 유향과 유속을 계산치와 비교하여 유동모델을 검증하였다.

2.3 잔차류의 시물레이션

조석류에 의한 조석 잔차류, 담수유입에 의한 밀도류가 합성되어 나타나는 잔차류를 시물레이션하였다. 바람에 의한 취송류는 제외하였고 유동이 정상상태에 도달한 마지막 한 조석을 조석주기로 평균한 항류를 잔차류로 하여 시물레이션하였다.

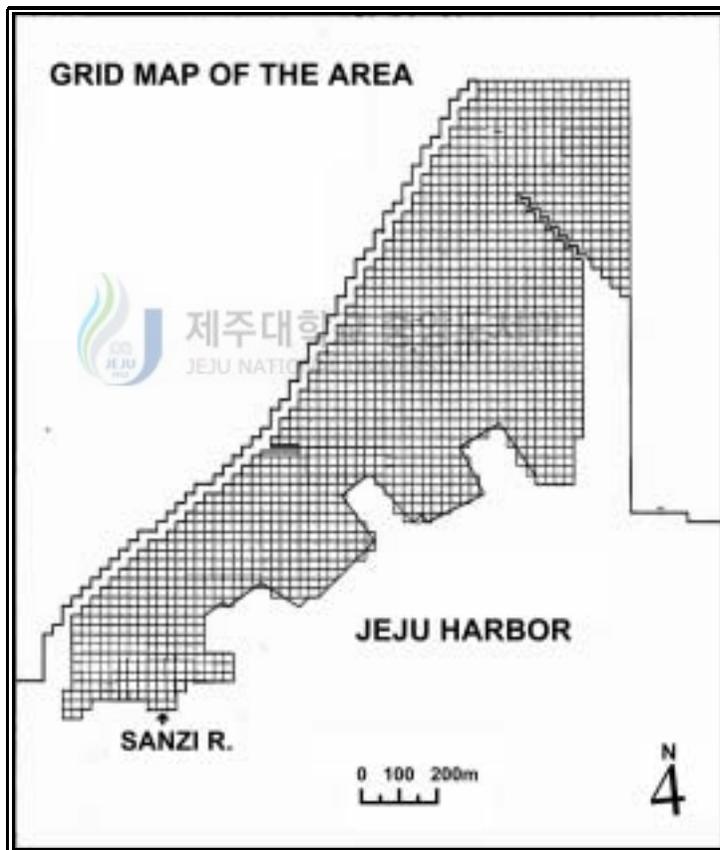


Fig. 8. The finite-difference grid of the three-dimensional model in the Jeju Harbor.

Table 3. Input data for a hydrodynamic model

Parameters	Input values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 25\text{m}$
Total mesh	$75 \times 89 \times 3 = 20025$
Water depth	chart datum + MSL
Time interval	5sec
Level	1 : 0 ~ 3m 2 : 3 ~ 6m 3 : below 6m
Tidal level and degree at open boundary	A : 69.7cm, 304.1。 B : 69.7cm, 304.1。
Water temperature and salinity at open boundary	level 1 : 19.7°C, 32.2‰ level 2 : 19.4°C, 32.3‰ level 3 : 19.3°C, 32.4‰
Coriolis coefficient	$f = 2 \cdot \omega \cdot \sin\Psi$
Surface & Internal friction coefficient	0.0013
Bottom friction coefficient	0.0026
Horizontal viscosity coefficient	1.0E5 (cm ² /s)
Diffusion coefficient	1.0E5 (cm ² /s)
Wind speed	none
Calculation time	20 tidal cycle

3. 생태계 모델의 적용

3.1 생태계 모델의 입력자료

생태계 모델의 모델영역은 해수유동모델에 사용된 격자망과 동일하게 적용하였고 유동모델의 계산결과 중에서 잔차류를 생태계모델의 시물레이션에 이용하였다. 시물레이션을 위한 모델의 구성요소들에 대한 값들은 Table 4와 Table 5에 나타내었다.

1) 초기치 및 경계치

생태계모델의 시물레이션을 위한 모델의 구성요소들에 대한 초기치 및 경계치는 Table 4와 같이 입력하였다. 각 수질항목 중 DO, COD, DIP, DIN, POC, DOC 그리고 식물플랑크톤의 초기치는 실측자료를 이용하여 산정하였고, 동물플랑크톤의 초기치 및 경계치(제주지방해양수산청, 1998; 2000)는 문헌 조사된 값을 이용하여 각각 수심별로 구분하여 입력하였다.

연직확산 계수의 경우, $1\text{cm}^2/\text{sec}$ 및 $10\text{cm}^2/\text{sec}$ 는 완전혼합조건을 나타내고 $0.1\text{cm}^2/\text{sec}$ 는 경미한 혼합조건을 나타낸다고 보고되고 있으므로(中田, 1991), 본 연구에서는 상하층간에 약한 성층을 이루고 있기 때문에 연직확산이 완만하다고 가정하여 전 층에 $0.1\text{cm}^2/\text{sec}$ 를 적용하였다.

2) 하천의 오염부하량

모델영역내인 제주항으로 유입되는 산지천의 오염부하량은 Table 5에 나타내었으며, 오염부하량은 2000년 8월, 11월, 2001년 2월 그리고 5월에 총 4회에 걸쳐 산지천 하류에서 수질조사한 값과 유량을 이용하여 각 항목별 입력자료로 적용하였다.

3) 저질 영양염용출량

대상해역의 수질오염과 영양상태의 결정, 영양염류의 물질수지를 생각할 경우 저질의 담당역할이 중요하게 대두되며 감소하천역과 만처럼 유속이 비교적 완만한 해역에서는 외부로부터 유입된 유기물과 현탁물질, 영양염류가 직·간접적으로 이용되어 부영양화를 야기하고 생산된 다량의 생물은 사멸하고 미생물학적 분해를 받으면서 침강

하여 미세한 입자까지 포함한 퇴적물을 형성하게 된다. 이런 퇴적물에는 각종의 혐기성, 호기성 세균이 밀집되어 있으므로 미생물의 활력에 따라 퇴적물의 성격은 끊임없이 변하며 산화, 환원과정으로 퇴적물내에서 현저한 물질변화의 교환이 일어나게 된다.

결과적으로는 퇴적물내에 다량 영양염류가 생성되어 다시 수층으로 공급원이 될 수 있다(村上 健, 1975). 즉, 오염물질을 다량으로 함유한 저층 퇴적물은 각종 형태로 상층 수질에 영향을 미치게 되어, 호기성 층에 존재하는 호기성 미생물의 호흡이나 더 깊은 층으로부터 용출된 환원성 물질의 산화에 의해서 상층수층의 용존산소의 소모가 일어나며, 동시에 유기물질이나 각종 영양염류가 용출되어 외부로부터의 오염원이 차단된 이후에도 오랜 기간동안 해역의 수질이 오염된 상태로 유지시키기에 충분할 정도이다(Fillos, 1975).

국내 해양저질에 관한 연구를 보면, 김(1995)은 황해에서 측정한 암모니아질소와 인산인의 용출속도를 각각 $24.65\text{mg/m}^2/\text{day}$, $9.90\text{mg/m}^2/\text{day}$ 로 산정하였고, 수산진흥원에서 원문만을 대상으로 조사하여 각각 얻은 암모니아질소와 인산인의 용출속도는 $17.8\text{mg/m}^2/\text{d}$ 및 $7.1\text{mg/m}^2/\text{d}$ 이었고 최(1993)가 진해만에서 $52.0\text{mg/m}^2/\text{d}$, $10.9\text{mg/m}^2/\text{d}$ 로 조사되었다. 김(1994)은 진해만과 마산만을 대상으로 실측한 값을 바탕으로 생태계 모델링시 암모니아질소와 인산인의 용출속도를 각각 $30.00\text{mg/m}^2/\text{day}$, $8.00\text{mg/m}^2/\text{day}$ 로 적용한 바 있다. 그러나 저질 영양염 용출속도는 측정지점의 위치와 측정방법에 따라 그 값의 변동이 매우 심하게 나타날 수 있다. 제주연안해역에서 용출속도를 실측한 자료는 없으므로, 본 연구에서는 황해에서 측정한 김(1995)의 자료를 바탕으로 제주항의 시뮬레이션에 적용하였다.

4) 생물학적 파라미터

생태계 모델의 시뮬레이션에 이용한 생물학적 parameter는 Table 6에 나타내었다. 모델에 사용된 입력자료는 실측 자료와 기존 측정된 자료를 적절히 적용하였고, 모델 parameter는 광범위하여 대부분은 문헌 조사를 통하여 선정하였다.

여기서 적용된 식물플랑크톤과 동물플랑크톤에 대한 계수들은 제주항 및 제주연안해역에서 조사되어 있는 종에 대한 문헌 값을 이용하였다. 제주연안에서 출현하는 식물플랑크톤의 경우, Diatom 그리고 동물플랑크톤의 경우는 Copepoda가 차지하는 비

율이 높기 때문에 이들 종에 대한 계수 값을 이용하였다(지방해양수산청, 2000).

식물플랑크톤 성장속도의 온도의존성을 지수함수로 표현한 대부분의 모델들은 20℃를 기준으로 하고 있으나, Eppley(1972)와 Thomann *et al.*(1975)은 0℃를 기준으로 하고 있다. Eppley(1972)는 다양한 종에 관한 많은 연구 결과로부터 0℃의 최대성장속도는 0.59/day이며, 20℃로 환산할 경우 2.09/day가 된다. 한편 Beca and Arnett(1976)는 20℃에서 0.2~8.0/day 범위를 제시하였다. 본 모델에서는 최대성장속도를 1.2/day를 적용하였다(Thomann *et al.*, 1979; Di toro and Connolly, 1980; Salisbury *et al.*, 1983).

식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 사멸속도는 본 모델에서 온도의 함수로 취급하였으나 불명확한 점이 많고 일반적으로 상수로 취급하고 있다. Richey(1977)는 Castle Lake의 담수 중에서 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 사멸속도를 동일하게 0.004/hour를 적용한 바가 있다. 식물플랑크톤의 경우 Thomann *et al.*(1975)은 0.02/day, Scavia and Eadie(1976)는 0.03/day, Jorgensen(1979)은 0.01~0.1/day로 제시하고 있으므로 본 모델에서는 식물플랑크톤의 사멸속도로 0.09/day를 적용하였다. 동물플랑크톤의 경우 O'Connor *et al.*(1973)은 0.075/day, Scavia *et al.*(1976)은 Copepods의 단일종에 대해 0.05/day로 보고하였으므로 본 모델에서는 동물플랑크톤의 사멸속도로 0.05/day를 적용하였다.

Chlorophyll a(mg/m³)와 식물플랑크톤의 탄소량(mgC/m³)에 대한 환산계수는 많은 연구자에 의해서 조사되었는데, 이 계수 값은 계절별로 차이가 있다고 보고되고 있다. C/Chl. a 비율을 변화시키는 요인은 빛의 세기, 영양염의 농도, 종조성 및 식물플랑크톤의 크기에 따라 차이가 나는데, 빛의 세기가 작은 상황에서는 Chl. a의 함량이 증가하며(Epply *et al.*, 1973; Fee, 1976), 식물플랑크톤의 세포에서 Chl. a 농도와 빛의 세기와는 역상관성이 있다고 하였다(Brown and Richardson, 1968). 따라서 광이 성장제한 요인이면 C/Chl. a 비율은 감소한다(Laws and Bannister, 1980; Hunter and Laws, 1981). 또한 영양염의 종류와 상관없이 영양염이 결핍될 때 C/Chl. a 비율이 증가하는데, 이는 세포내의 탄소량 증가와 Chl. a의 감소 때문이다(Thomas and Dodson, 1972). C/Chl. a 비율은 식물플랑크톤의 크기가 커질수록 증가하는 경향을 가진다(Takahashi and Bienfang, 1983). 심 등(1989)은 천수만을 대상으로 조사한 C/Chl. a 비에서 하계 6월의 평균 측정값으로 표층의 경우 30을 적용하였고, 김(1994)

은 진해만에서 하계 평균값으로 31을, 마산만에는 15를 적용하였다. 황해를 대상으로는 김(1995)과 김(1999)이 68을 적용하였고, 제주 중문 연안역에서 이(2002)가 50을 적용하였다. 본 모델에서는 C/Chl. a의 비를 이(2002)의 자료를 이용하여 50을 적용하였다.

입자상 유기물의 분해속도는 20℃를 기준으로 Yoshida(1983)는 0.19~0.38/day 범위, 宋 등(1991)은 0.20~0.23/day 범위로 제시하였다. 본 모델에서는 분해속도를 $k = \alpha_5 \cdot \exp(\beta_5 \cdot T)$ 와 같이 온도 의존성으로 표현하고 있으므로 0℃에서 최대 분해속도 α_5 와 온도계수 β_5 는 Ishikawa와 Nishimura(1983)가 대판만에서 관측한 자료를 이용하여 산정하였다. 봄철(15℃)에 大阪灣에서 관측된 평균분해 속도는 평균 0.21/day였고 여름철(25℃)에는 평균 0.27/day였으므로 α_5 값은 0.15/day가 된다. 그리고 bansal(1975)은 CBOD의 분해속도를 0.02~3.37/day 범위로 광범위하게 제시하고 있으므로 여기서는 0.01/day를 입력인자로 하였다.

용존성 유기물(DOC)의 분해속도는 온도와 용존산소 농도의 함수로 표현된다. 해수 중 DOC의 분해속도는 0.0017~0.25/day 범위로 변화폭이 넓으므로 여기서는 0.004/day를 입력인자로 하였다.

3.2 수질현황 시뮬레이션

생태계 모델은 3차원 해수유동모델의 계산에서 얻은 잔차류를 생태계모델의 입력자료로 이용하여 시뮬레이션을 행함으로써 제주항내의 COD, 용존무기질소 그리고 용존무기인의 분포를 시뮬레이션하였다. 그리고 계산결과가 실측치와 어느 정도 일치하는지를 판단하기 위해서 수질조사를 실시한 5개 정점의 실측치와 계산치를 비교하였다.

3.3 제주항의 수질시뮬레이션

제주항의 수질시뮬레이션을 하기 위해 해수유동모델과 생태계 모델로 구성된 물질순환모델을 이용하였고, 그 결과를 이용하여 제주항의 수질개선을 위한 오염부하량 저감방안을 평가하였다. 저감방안으로는 제주항으로 유입되는 오염부하를 크게 두 가지로 구분하여 평가를 하였으며, 외부부하인 산지천을 통하여 제주항내로 유입되는

육상오염부하와 내부부하인 저질용출부하를 선택하여 제주항의 수질개선을 위한 방안을 도출하였는데 해양수질항목으로는 COD, N 그리고 P를 이용하여 정량적으로 평가하였다.

Table 4. Input data for ecosystem model

Parameter		Input values						
Mesh size		$\Delta x = \Delta y = 25\text{m}$						
Water depth		chart datum + MSL						
Time interval		300 sec						
Initial condition for compartments								
level	DO	COD	DIP	DIN	POC	DOC	PHYTO	ZOO
	(mg/L)		(mmole/m ³)			(mg-C/m ³)		
1	8.20	2.20	0.68	10.0	400	1800	40	5
2	8.20	2.00	0.68	8.00	350	1600	20	5
3	8.20	2.00	0.68	6.00	350	1400	20	5
Boundary condition for compartments								
level	DO	COD	DIP	DIN	POC	DOC	PHYTO	ZOO
	(mg/L)		(mmole/m ³)			(mg-C/m ³)		
1	8.30	1.50	0.40	5.00	350	1600	40	5
2	8.30	1.50	0.40	5.00	300	1200	20	5
3	8.20	1.50	0.45	4.50	300	1200	20	5
Horizontal viscosity coefficient		1.0 E5(cm ² /s)						
Horizontal diffusion coefficient		1.0 E5(cm ² /s)						
Vertical diffusion coefficient		level 1~3 : 0.1(cm ² /s)						
Calculation time		100 tidal cycles						

Table 5. Monthly variation of pollutant loads discharged into Jeju Harbor

Name of river	Pollutant loads						
	River flow	COD	DO	DIP	DIN	POC	DOC
	m ³ /day	(ton/day)		(kg/day)	
Sanzi R.	5.59E+04	0.30	0.40	18.0	300.0	35.0	250.0

Table 6. The biological parameters in an ecosystem model for the Jeju Harbor

No.	Symbol	Unit	Input values	Typical values
1	α_1	day ⁻¹	1.20	0.55~3.40
2	β_1	°C ⁻¹	0.0633	
3	α_2	day ⁻¹	0.05	0.05~0.59
4	β_2	°C ⁻¹	0.050	0.044~0.0524
5	α_3	day ⁻¹	0.180	0.180
6	β_3	°C ⁻¹	0.0693	0.058~0.12
7	α_4	day ⁻¹	0.09	0.096~0.330
8	β_4	°C ⁻¹	0.0693	
9	α_5	day ⁻¹	0.05	0.05
10	β_5	°C ⁻¹	0.0693	
11	α_6	day ⁻¹	0.01	0.001~0.237
12	β_6	°C ⁻¹	0.07	0.041~0.070
13	α_7	day ⁻¹	0.004	0.0017~0.25
14	β_7	°C ⁻¹	0.0693	
15	α_8	day ⁻¹	1.000	
16	β_8	°C ⁻¹	0.0693	
17	K_{SP}	$\mu\text{g-at/L}$	0.536	0.032~5.263
18	K_{SN}	$\mu\text{g-at/L}$	8.571	0.214~66.07
19	I_{opt}	ly/day	195.8	
20	I_{max}	ly/day	461.5	
21	D	day	0.51	
22	k_o	m ⁻¹	0.34	0.34~1.7
23	k	m ⁻¹ (mgChl/m ³) ⁻¹	0.0179	
24	ν	(mgC/m ³) ⁻¹	0.01	0.004~0.025
25	P^*	mgC/m ³	70.0	40.0~190.0
26	μ	%	70.0	39.0~98.0
27	λ	%	30.0	4.0~50.0

Table 6. The biological parameters in an ecosystem model for the Jeju Harbor
(continued)

No.	Symbol	Unit	Input values	Typical values
28	κ	%	35	21 ~ 35
29	K^1_{DO}	mg/L	1.000	0.0035 ~ 1.000
30	K^2_{DO}	mg/L	1.000	0.0035 ~ 1.000
31	W_p	m/day	0.100	0.005 ~ 0.4
32	W_{POC}	m/day	0.300	0.0 ~ 2.0
33	W_z^1	m/day	0	
34	W_z^2	m/day	0	
35	K_a	day ⁻¹	0.25	0.025 ~ 0.650
36	[P:Cp]	weight ratio	3.500E-4	2.500E-4 ~ 1.170E-2
37	[N:Cp]	weight ratio	2.117E-3	5.580E-3 ~ 1.750E-2
38	[TOD:Cp]	weight ratio	3.410E-3	variable
39	[COD:Cp]	weight ratio	1.510E-3	variable
40	[Chl:Cp]	weight ratio	2.000E-2	9.0E-3 ~ 4.0E-2
41	[P:Cz]	weight ratio	4.040E-4	1.430E-4 ~ 3.30E-2
42	[N:Cz]	weight ratio	7.320E-3	1.0E-2 ~ 2.8E-1
43	[TOD:Cz]	weight ratio	3.510E-3	variable
44	[COD:Cz]	weight ratio	1.550E-3	variable
45	[P:C _{POM}]	weight ratio	4.048E-4	variable
46	[N:C _{POM}]	weight ratio	7.321E-3	variable
47	[TOD:C _{POM}]	weight ratio	3.330E-3	variable
48	[COD:C _{POM}]	weight ratio	1.460E-3	variable
49	[P:C _{DOM}]	weight ratio	4.581E-4	variable
50	[N:C _{DOM}]	weight ratio	7.143E-3	variable
51	[TOD:C _{DOM}]	weight ratio	3.120E-3	variable
52	[COD:C _{DOM}]	weight ratio	1.380E-3	variable

IV. 결과 및 고찰

1. 수질현황

제주항의 수질특성을 조사하기 위하여 2000년 8월, 11월, 2001년 2월, 5월에 총 4회에 걸쳐 5개의 지점에서 표층수, 중층수 그리고 저층수를 채수하여 분석한 조사지점별 범위 및 평균값을 Table 7에 나타내었다. 또한 COD, DIN 그리고 DIP 항목에 대하여 해역의 하천유입부에서 외해역으로 이어지는 정점 St 1, 2, 3, 4 그리고 5를 연결한 선의 수평분포를 Fig. 9, 10 그리고 Fig. 11에 나타내었다. 그리고 영양염으로 인한 제주항의 부영양도를 평가하기 위한 부영양화 지수 및 N/P비를 Table 8에 나타내었다.

1.1 수질특성



1) 일반항목의 수질특성

해수의 수온은 일사량 및 일조시간의 영향을 받는 계절적인 인자로서 각종 이온 및 유기물의 변화를 유발하는 생화학적 변환 과정과 자정 작용 등에 영향을 주고, 수심에 따른 성층 현상을 유발하여 연안수괴의 혼합특성을 결정하게 되는 주요 인자이다. 수온 변화에 따라서 육상으로부터 유입된 오염물질의 혼합특성과 분해특성, 그리고 재생산의 속도 등이 변화함으로써 전체적인 환경에 변화를 가져오게 된다. 전 조사기간에 걸쳐 수온분포를 보면, 표층에서 12.9~28.2℃, 중층에서 13.3~26.6℃ 그리고 저층에서 13.6~25.5℃의 범위를 나타내었으며, 연교차는 약 14℃였다. 월별로는 2월이 가장 낮은 분포를 보였고 8월이 가장 높은 수온분포를 보였다.

담수의 영향을 직접적으로 나타내어 수괴의 특성을 구명하는 중요한 인자인 염분은 표층에서 21.1~33.9‰, 중층에서 28.6~33.9‰ 그리고 저층에서 28.8~33.9‰의 범위를 나타내었으며, 월별로는 유입수량이 많은 8월이 상대적으로 낮은 값을 보였다.

생물의 서식, 양식 및 산란에 적합한 환경의 지표로 사용되는 용존산소의 농도분포는 전 조사 기간에 걸쳐 5.1~9.1mg/L(평균 7.3mg/L)의 범위를 나타내었고, 각층별 평균값은 각각 6.93mg/L, 7.28mg/L 그리고 7.60mg/L였다.

총부유물질(TSS)은 육상기원의 유기·무기물의 유입이나 저층 퇴적물의 재부유에 의해 영향을 받는 인자로서, 태양광의 투과를 방해하여 식물플랑크톤의 광합성을 저해하고, 해조류 및 패류의 표면에 부착하여 성장에 영향을 주거나 폐사의 원인이 되기도 한다. 해수 중 현탁입자의 농도를 나타내는 총부유물질의 분포를 보면, 전 조사 기간에 걸쳐, 표층에서 2.2~9.4mg/L(평균 4.8mg/L), 중층에서 2.0~6.8mg/L(평균 3.9mg/L) 그리고 저층에서 1.40~5.5mg/L(평균 3.5mg/L)의 범위를 나타내었고, 만내 전체 평균값은 4.3mg/L을 나타내었다.

2) 화학적 산소요구량 (COD)

해역에서 유기오염의 일반 지표인 COD의 농도분포를 보면, 전 조사기간에 걸쳐, 표층에서 1.18~4.85mg/L(평균 2.7mg/L), 중층에서 1.18~3.38mg/L(평균 2.0mg/L) 그리고 저층에서 1.0~2.14mg/L(평균 1.7mg/L)의 범위를 나타내었고 만내 전체 평균값은 2.15 mg/L을 나타내었으며, 대상해역의 대부분이 III등급해역에 속하였다. 월별로는 8월과 5월이 각각 2.70mg/L과 2.46mg/L로 높았고 2월이 1.51mg/L로 가장 낮은 값을 보였다. 지점별로 보면 하천수가 많이 유입되는 만 안쪽 지점인 St. 1이 조사 기간동안에 높은 값을 보이는 것을 알 수 있으며, St. 5 까지 외해로 갈수록 표층에서 3.91~1.98mg/L로 낮아졌고, 특히 만폭이 좁고 유속이 큰 St. 3에서 월변화량이 가장 크게 나타났다.

3) 클로로필 a (Chlorophyll a)

해역에서 자생유기물질의 하나인 식물성플랑크톤은 대체적으로 부영양화된 해역에서 환경조건(일사량, 수온, 영양물질의 농도 등)이 적합할 때 대량으로 번식하는데 그 양은 엽록소(Chl. a)의 양으로 나타낸다.

해수 중에서 식물플랑크톤의 양을 나타내는 Chl. a의 분포를 보면, 전 조사기간에 걸쳐, 표층에서 0.02~6.41 μ g/L, 중층에서 0.01~3.40 μ g/L 그리고 저층에서 0.01~0.83 μ g/L의 범위를 나타내었다. 월별 농도변화는 8월이 각 층별 4.40 μ g/L, 1.91 μ g/L 그리고 0.72 μ g/L로 상대적으로 높은 값을 보여 하계에 식물플랑크톤의 생산력이 가장 크게

나타났고, 2월에 낮은 값을 나타내었다. 지점별로는 하천부하량이 유입하는 St. 1이 조사 기간동안에 높은 값을 보이는 것을 알 수 있으며 St. 5 까지 외해로 갈수록 값이 대체적으로 낮은 값을 보이는 것을 알 수 있다.

조사기간중 전해역에서 값은 EPA-NES(1974)에서 제시한 적조발생 가능 농도인 10 mg/m^3 보다는 낮게 나타났다.

4) DIN

용존무기질소(DIN)는 수중생물, 특히 식물플랑크톤 성장에 필요한 영양원으로 해역에서 가장 부족하기 쉬운 원소로 알려져 있다. DIN은 생·화학적 작용에 의하여 순환하며 과다하게 존재하면 부영양해역이 되어 적조 발생의 원인으로 작용하게 된다.

해역의 부영양화에 관계되며 영양염중 암모니아 질소, 아질산 질소 그리고 질산 질소의 합계량으로 나타내는 용존무기질소 분포를 보면, 조사 기간 중 DIN의 농도는 표층에서 $3.84 \sim 74.0 \mu\text{g-at/L}$, 중층에서 $2.14 \sim 18.47 \mu\text{g-at/L}$ 그리고 저층에서 $3.42 \sim 12.27 \mu\text{g-at/L}$ 의 범위를 나타내며 평균농도는 각각 $21.69 \mu\text{g-at/L}$, $8.73 \mu\text{g-at/L}$ 그리고 $6.16 \mu\text{g-at/L}$ 였다.

지점별로는 하천수가 유입하는 만 안쪽이 높고 외해로 갈수록 급격히 감소하는 경향을 나타내었으며, 만 입구지점에서 암모니아질소가 가장 높은 분율을 나타내었으나, 전체적으로 질산성질소가 높게 나타났다. 월별로는 유입하천부하량이 높은 2월에 표층에서 $27.03 \mu\text{g-at/L}$ 로 가장 높게 나타났다.

본 해역에서 측정된 표층의 총무기질소 농도를 2001년 개정된 해역수질환경기준인 농도와 비교해 보면, 평균농도에서 III등급수인 $14.2 \mu\text{g-at/L}$ 을 초과하는 것으로 조사되었다. 기존의 자료에 따르면 제주연안의 연평균 수질현황은 $9.92 \sim 52.85 \mu\text{g-at/L}$ 이며 III등급에 해당되는 것으로 조사되었다(해양수산부, 1998).

5) DIP

용존무기인(DIP)은 DIN과 함께 해양생물의 제한인자로 작용하는 중요한 영양염의 하나로 도시하수에 포함되어 있는 합성세제와 저층 퇴적물의 용출이 주부하원이다.

인산 염의 농도분포를 보면, 전 조사기간에 걸쳐, 표층에서 $0.57 \sim 4.00 \mu\text{g-at/L}$, 중층에서 $0.58 \sim 1.42 \mu\text{g-at/L}$ 그리고 저층에서 $0.89 \sim 1.47 \mu\text{g-at/L}$ 의 범위를 나타내며 평균농

도는 각각 $1.43\mu\text{g-at/L}$, $1.01\mu\text{g-at/L}$ 그리고 $1.09\mu\text{g-at/L}$ 을 나타내었다.

지점별로는 하천수가 유입하는 만 안쪽이 높고 외해로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었으나 5월과 8월에 만 중앙부에서 상승하는 경향을 보여 영양염 용출의 영향을 보인다. 표층에서 하천유입부인 St. 1지점과 St. 2지점의 수평분포는 $2.95\sim 1.24\mu\text{g-at/L}$ 로 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. St. 1지점 표층에서 DIP의 월별 농도변화가 $2.30\sim 4.00\mu\text{g-at/L}$ 가장 높게 나타났으며, 월별농도변화를 보면 총무기질소와는 반대의 경향을 보이는 것을 알 수 있으며 2월에 최소값을 보이고 8월에 최대값을 보였다.

이 결과는 2001년 개정되기 전 해양수질환경기준인 농도와 비교하면 평균농도로 III등급수($0.97\mu\text{g-at/L}$)의 높은 수질을 나타내었고, 기존의 자료에 따르면 제주연안의 연평균 수질현황은 인이 $0.45\sim 1.45\mu\text{g-at/L}$ 이며 제주항내는 III등급에 해당되는 것으로 조사되었다(국립수산진흥원, 1999).



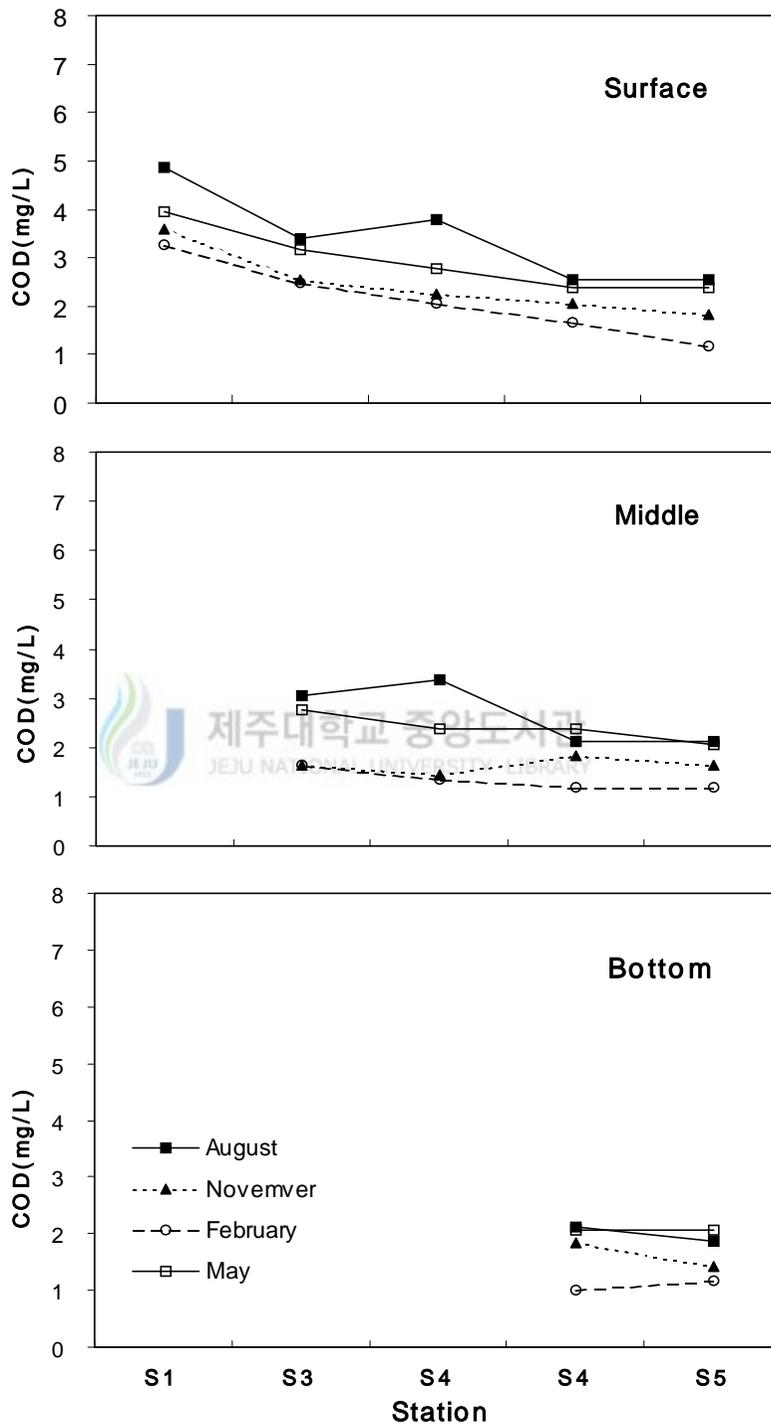


Fig. 9. Monthly variations of COD(mg/L) at each stations.

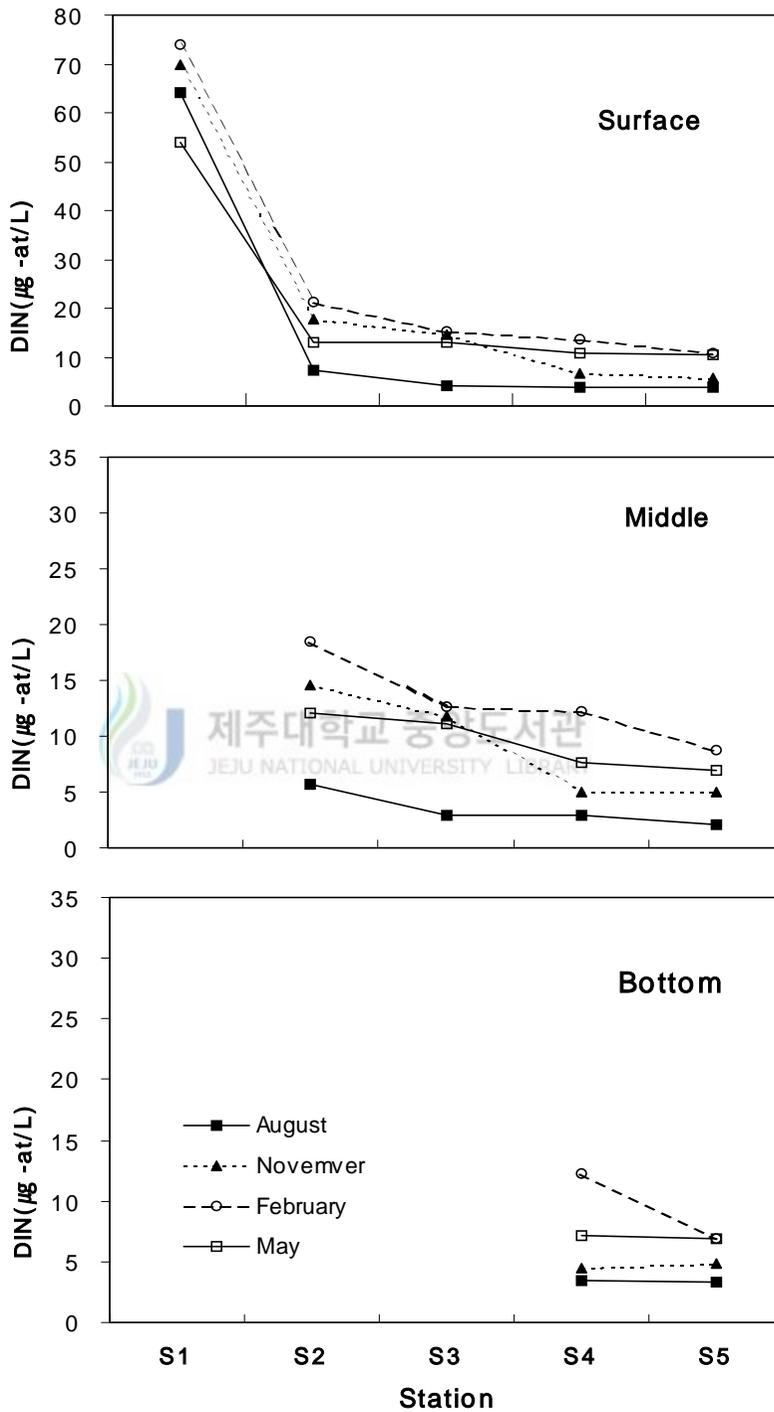


Fig. 10. Monthly variations of DIN($\mu\text{g-at/L}$) at each stations.

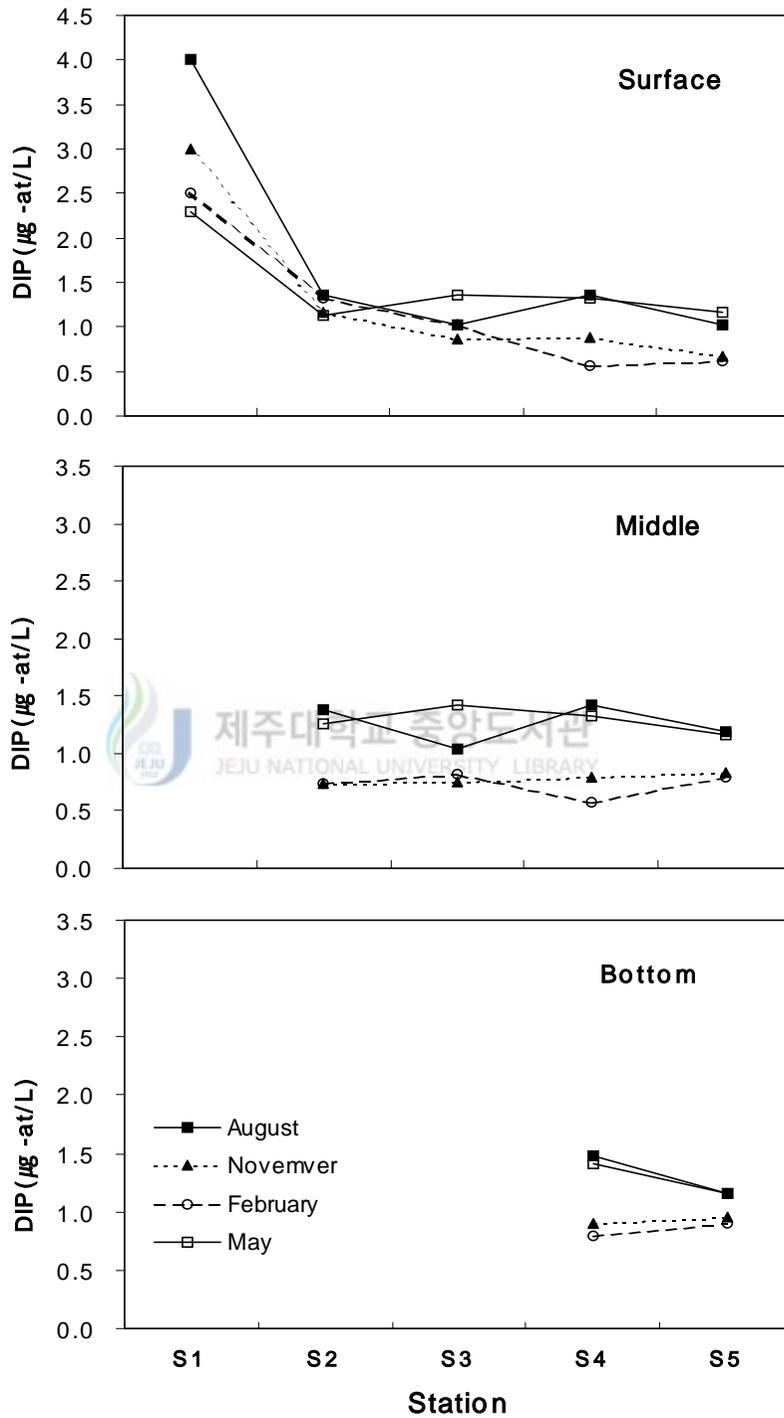


Fig. 11. Monthly variations of DIP($\mu\text{g-at/L}$) at each stations.

Table 7. Range and mean values of water quality in Jeju harbor

St. No.	Temp. (°C)	Sal (‰)	COD (mg/L)	DO (mg/L)	SS (mg/L)	DIP (mg/L)	DIN (mg/L)	POC (mg/L)	DOC (mg/L)	Chl.a μg/L
S1	12.9~27.4	21.0~32.0	3.2~4.9	5.5~8.1	4.9~9.4	0.071~0.124	0.756~1.036	0.60~1.43	2.26~3.87	0.126~6.410
	19.3	25.3	3.9	6.9	7.4	0.091	0.917	0.97	2.67	3.138
1	12.9~28.2	26.9~32.4	2.5~3.4	5.1~8.2	2.6~8.4	0.035~0.042	0.101~0.300	0.42~.85	2.13~3.90	0.145~5.550
	19.6	29.8	2.9	6.0	5.0	0.038	0.208	0.61	2.79	3.059
S2	13.3~26.0	28.6~33.4	1.6~3.1	5.5~8.0	3.5~6.2	0.023~0.043	0.080~0.259	0.23~0.60	1.43~3.60	0.048~3.398
2	19.2	31.9	2.3	6.4	4.5	0.032	0.178	0.45	2.22	1.425
1	13.3~27.7	27.8~33.2	2.1~3.8	5.9~8.0	2.5~5.6	0.027~0.042	0.057~0.212	0.23~0.76	1.74~3.13	0.046~5.443
	19.6	31.7	2.7	6.9	4.1	0.033	0.163	0.45	2.47	2.900
S3	13.5~25.8	28.8~33.8	1.4~3.4	6.7~8.2	3.1~6.8	0.016~0.044	0.040~0.177	0.05~0.73	1.27~2.13	0.133~1.749
2	19.2	32.1	2.1	7.3	4.7	0.028	0.134	0.40	1.62	0.683
1	13.4~27.7	27.8~33.7	1.7~2.5	5.6~8.2	3.0~5.0	0.018~0.042	0.054~0.192	0.36~0.78	1.60~2.27	0.060~4.412
	19.6	31.9	2.2	7.2	4.0	0.032	0.123	0.49	1.89	1.928
S4	13.6~25.7	28.8~33.8	1.2~2.4	6.4~8.3	2.1~4.7	0.018~0.044	0.040~0.170	0.14~0.43	1.61~2.06	0.063~1.233
2	19.2	32.1	1.9	7.5	3.4	0.032	0.097	0.31	1.80	0.463
3	13.6~23.8	28.8~33.9	1.0~2.1	6.0~8.3	3.9~5.5	0.028~0.050	0.048~0.172	0.11~0.65	1.05~2.14	0.010~0.831
	18.8	32.2	1.8	7.4	4.5	0.039	0.096	0.39	1.49	0.250
1	13.7~27.3	28.0~33.9	1.2~2.5	5.9~8.4	2.2~5.0	0.019~0.036	0.054~0.152	0.29~0.72	1.43~2.31	0.020~1.474
	19.8	32.0	2.0	7.6	3.7	0.027	0.108	0.52	1.75	0.541
S5	13.5~25.6	28.9~33.9	1.2~2.1	6.2~9.1	2.0~3.8	0.024~0.037	0.030~0.123	0.11~0.50	1.30~2.29	0.010~1.252
2	19.2	32.2	1.8	7.9	3.0	0.031	0.80	0.35	1.74	0.343
3	13.6~25.5	28.9~33.9	1.2~2.1	6.0~9.0	1.4~4.6	0.030~0.044	0.047~0.097	0.05~0.57	1.15~2.21	0.010~0.650
	19.2	32.3	1.6	7.8	2.6	0.036	0.077	0.35	1.61	0.160

1.2 부영양도 평가 및 N/P비

제주항의 수질분석결과를 보면 항내의 대부분 정점에서 COD, N, P의 농도분포가 해역수질등급 III등급으로 조사되었다. 이러한 COD, N, P의 수질현황과 관련하여 대상해역에서의 부영양도 정도와 조류성장에 필요한 영양염에 대한 제한인자를 평가하기 위하여 해역의 부영양도와 N/P ratio를 Table 8에 나타내었다.

해역에서 적조를 유발하는 영양염 농도를 이용하여 부영양화 지수(Eutrophication Index)를 산정하고 이 부영양화 지수를 기준으로 해역의 부영양도를 평가하는 방법이 있으며, 이는 부영양화로 인하여 적조가 발생할 때, 그 초기에 나타나는 규조류의 세포수 10^3 개체수/mL에 포함된 0.83mgC/L (=COD 1mg/L)의 탄소량을 기준으로 하고, N, P에 대해서는 각각 $7.14\mu\text{g-at/L}$ 및 $0.48\mu\text{g-at/L}$ 을 적조 발생 가능 농도로 보고 계산한 값을 부영양도 1로서 평가하는 방법이다(Okaichi, 1985).

$$\text{Eutrophication Index(EI)} = \frac{\text{COD}(\text{mg} / \ell) \times \text{DIN}(\mu\text{g} - \text{at} / \ell) \times \text{PO}_4^{3-} - \text{P}(\mu\text{g} - \text{at} / \ell)}{3.43}$$

부영양도지수를 보면, 제주항만내에서는 계절에 상관없이 기준치인 1을 훨씬 초과하는 것으로 나타났으며, 외해로 갈수록 점차 낮아졌다.

용존무기질소(DIN)와 용존무기인(DIP)의 비율인 N/P비는 식물플랑크톤의 원소비가 N : P가 16 : 1이므로 N/P비가 16보다 크면 질소계 무기영양염류가 인산염 보다 풍부하므로 인이 식물플랑크톤의 제어인자가 되며 반대로 16보다 적으면 질소가 제어인자가 되는 것으로 일반화시킬 수 있다(해양연구소, 1983). 산지천 유입수의 영향을 받는 정점 St. 1은 N/P비가 16이상으로 인이 제한 인자이지만, 그 외의 대부분의 정점에서는 16이하를 나타내어 제주항 내에서 식물플랑크톤 성장의 제한 인자는 질소인 것으로 나타났다.

Table 8. Eutrophication index and N/P ratio at each month in study area

St. No.		00/08		00/11		01/02		01/05	
		N/P	EI	N/P	EI	N/P	EI	N/P	EI
S1	1	20.06	208.07	31.00	134.06	35.28	113.76	31.14	77.27
S2	1	5.31	9.61	15.32	14.81	16.24	20.37	11.51	13.45
	2	4.12	7.05	19.80	5.12	25.04	6.55	9.56	12.29
S3	1	3.92	4.63	16.73	8.33	14.67	9.39	9.54	14.09
	2	2.77	2.91	16.84	3.44	15.41	2.60	7.80	10.86
S4	1	2.86	3.89	7.71	3.54	24.09	3.77	8.17	9.87
	2	2.01	2.51	6.31	2.12	20.97	2.43	5.73	6.93
	3	2.25	3.20	4.52	2.41	13.65	3.22	4.41	6.89
S5	1	3.72	2.93	8.29	2.01	17.43	2.32	9.00	8.39
	2	1.80	1.58	6.08	1.99	11.09	2.38	5.99	4.85
	3	2.87	2.12	5.01	1.93	6.06	2.74	4.86	4.81

2. 해수유동시물레이션

2.1 조석류의 시물레이션

3차원 수치모델의 적용가능성을 검토하기 위하여 관측치와 계산치를 Fig. 12를 이용하여 비교하였다.

일반적으로 조석류 시물레이션한 결과를 비교 검토하는 방법으로 25시간 정도의 조석의 흐름이 나타내고 있는 조류타원도를 이용하여 비교하는 경우가 많다. 그러나 제주항의 경우 실측한 자료가 전무한 실정이며, 조사된 자료는 제주시(1999)가 1999년 8월에 조사한 창조류의 유속과 유향을 나타낸 자료밖에 없었다. 관측치의 경우는 이 자료를 이용하였고, 계산치는 조사기간의 평균자료를 입력하여 시물레이션한 조류타원도를 이용하였다. 결과를 보면 항만의 중앙부에서는 약간의 유향의 차이를 보였으나 유속의 크기는 전반적으로 관측치와 계산치가 잘 일치됨을 알 수 있다. 따라서 본 모델에서 제시된 결과는 제주항 내의 유속분포를 잘 나타내고 있다고 사료된다.

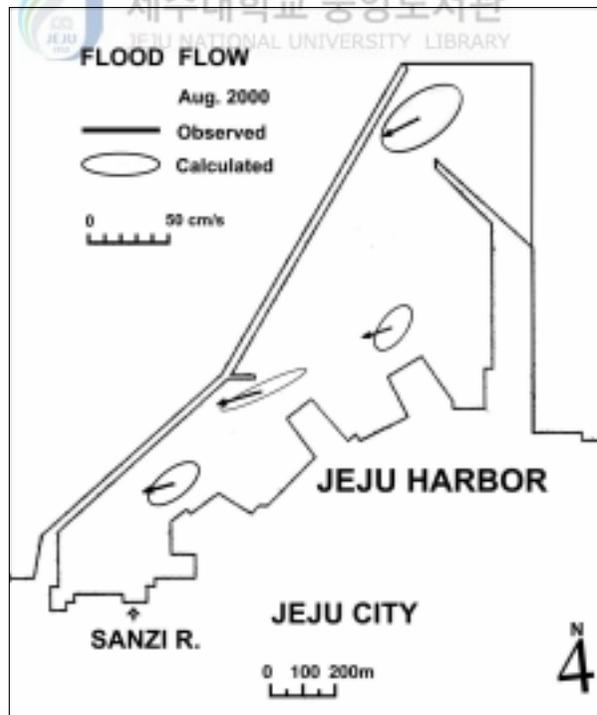


Fig. 12. Comparison of tidal current between computed and observed results.

제주항에서의 조류분포특성은 밀도류를 고려한 제주항의 경우 수심이 대체적으로 얇고 조석이 강함으로 인하여 표층, 중층 그리고 저층의 유동 형태나 유속 크기는 큰 변화가 없었다. 표층의 경우 항만 입구부에서는 30~40cm/sec의 강한 유속대를 보여주고 있으나 항만의 중앙부분과 산지천이 있는 항만 안쪽 부분에서는 유속이 다소 감소하여 대체적으로 10~20cm/sec 내외로 나타났다. 전반적인 유동양상을 보면 창조류와 낙조류 때의 유동은 위상이 반대인 것 외에는 거의 같은 유속분포를 보여주고 있는 것을 알 수 있었고, 제주항의 창조류와 낙조류의 유속분포는 층별로 Fig. 13, 14에 나타내었다.

중층과 저층에서의 유동은 유속이 항만의 입구부에서는 표층과 유사하게 강한 유속을 보여주고 있으나 전반적으로 유속이 20cm/sec 내외로 나타나 표층에 비해서 약간 감소된 경향을 보여주고 있다. 그러나 전반적인 유동 패턴은 표층과 유사하게 나타났다.

2.2 잔차류 시뮬레이션

제주항의 잔차류 분포는 Fig. 15에 나타내었다.

표층의 잔차류 패턴을 보면 항만 입구부에는 강한 와류가 발생되는데 이것은 주로 유속이 강하게 작용하는 조석류의 비선형성분에 의하여 발생된 것으로 사료된다. 또한 항만의 중앙부에 방파제로 인하여 좁아지는 해역에서도 약간의 와류가 발생되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 볼 때 잔차류는 지형이 갑자기 바뀌는 해역과 밀도가 강하게 형성될 수 있는 해역에 잘 발생될 수 있음을 보여준다.

중층에서의 잔차류 패턴을 보면 표층에서와 마찬가지로 항만의 입구부에서 강한 잔차류의 특성을 보여주고 있으며 또한 표층과 마찬가지로 중층에도 약간의 와류를 보여주고 있다. 저층에서의 잔차류 패턴을 보면 표층이나 중층에 보이듯이 항만의 입구부에는 여전히 상대적으로 강한 잔차류를 보여주고 있으나 중층에서 보여주었던 항만 중앙부의 잔차류는 나타나지 않고 있다.

표층에서는 담수유입에 의한 밀도류가 나타났는데, 중층 아래에서는 그 성분이 약해지면서 반대로 하구쪽으로 향하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 인해, 저층에 침강한 오염물질은 외해로 유출되지 못하고 점차적으로 하구 내만에 축적될 수 있다.

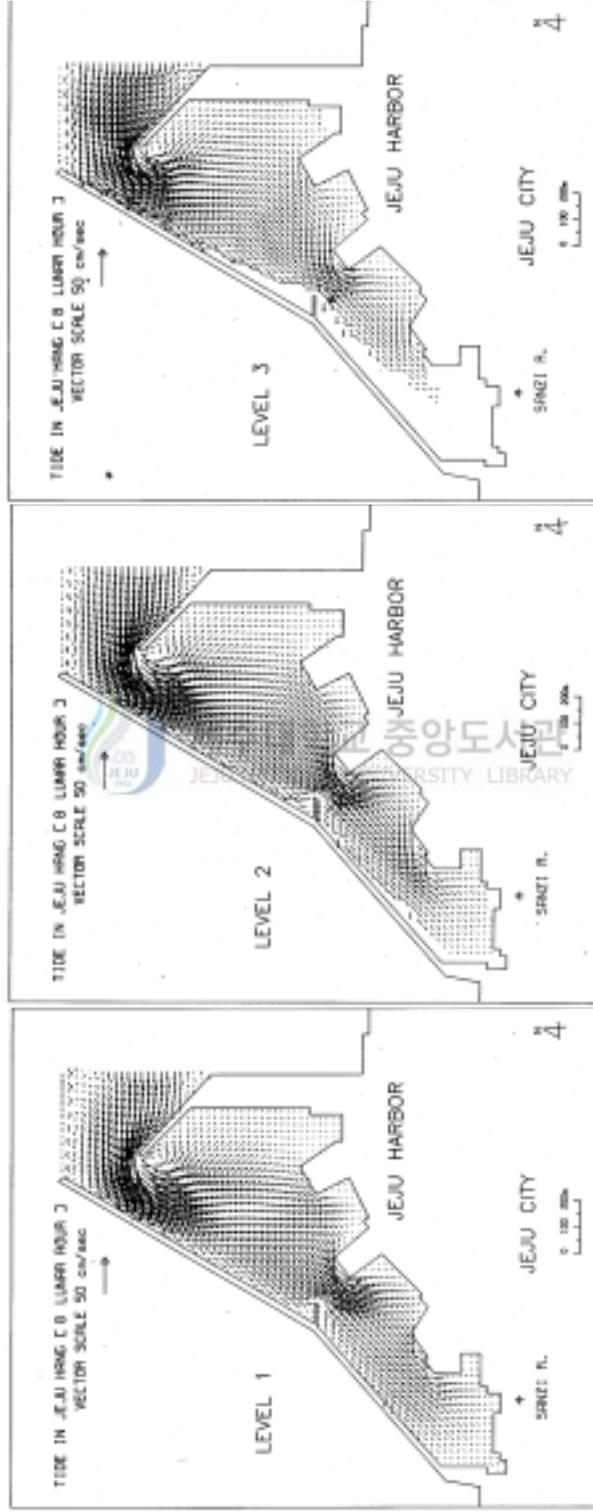


Fig. 13. Distribution of computed tidal currents during the Flood tide.

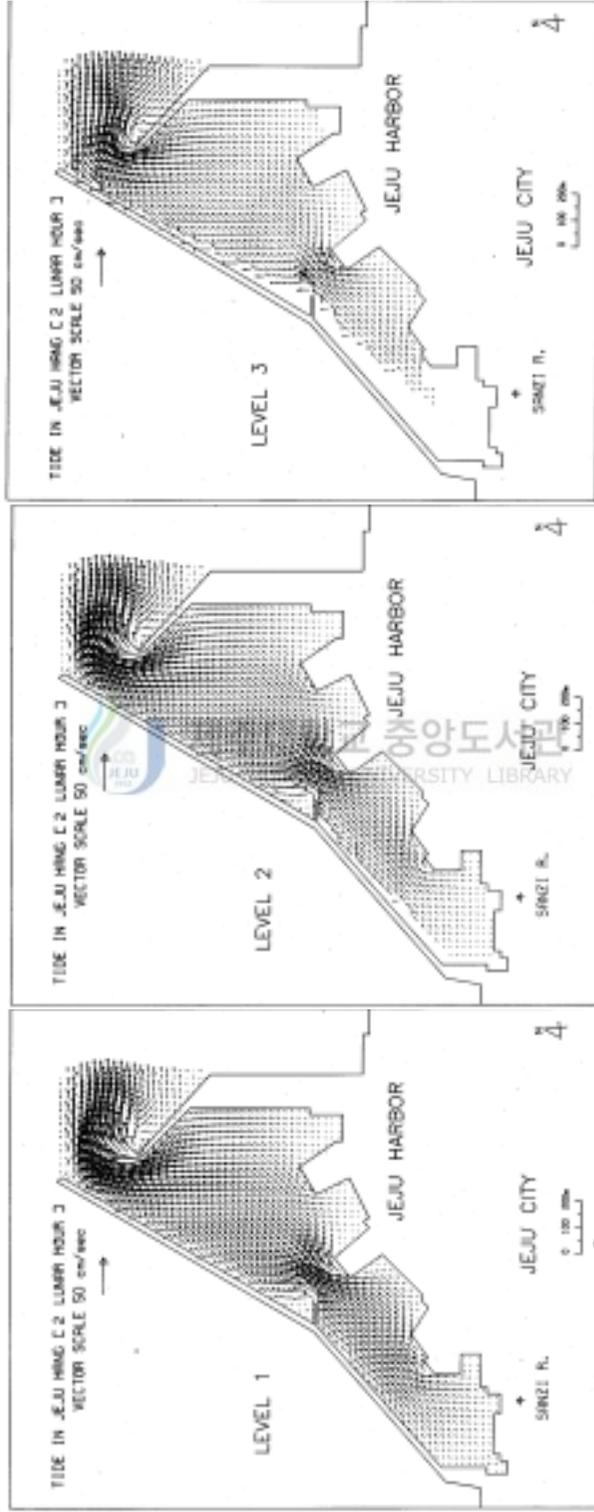


Fig. 14. Distribution of computed tidal currents during the Ebb tide.

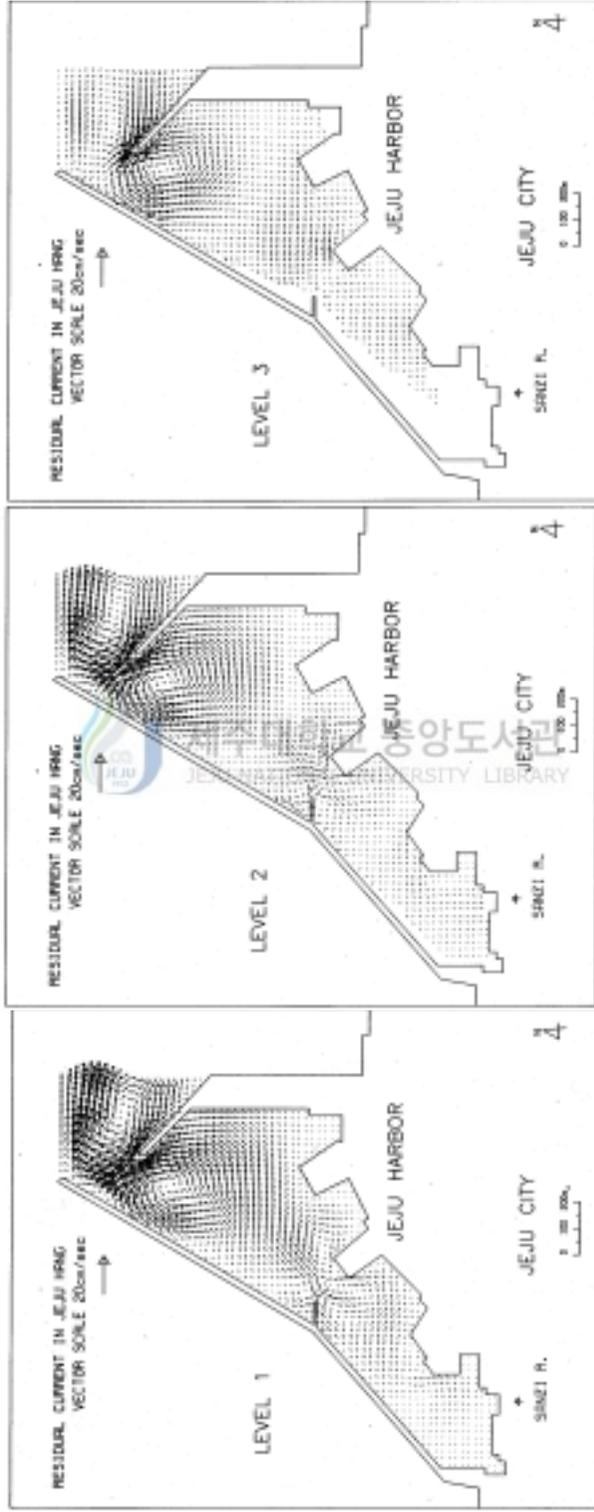


Fig. 15. Distribution of computed residual currents in Jeju Harbor.

3. 생태계시물레이션

3.1 수질현황 시물레이션

생태계 모델은 3차원 해수유동모델의 계산에서 얻은 잔차류 결과와 Table 4에서 Table 6까지 제시한 초기조건, 경계조건 그리고 하천오염부하량을 모델에 입력한 후 시물레이션을 실행하였다. 시물레이션된 제주항내의 COD, 용존무기질소 그리고 용존무기인의 수층별 분포는 Fig. 16에서 Fig. 18까지 나타내었다.

Fig. 16에 제시한 COD의 분포를 살펴보면 표층의 경우, 지점별 분포특성으로 제주항내로 유입하는 산지천의 영향을 가장 크게 받는 정점 St. 1 부근의 농도는 3.5mg/L에서 4.2mg/L의 높은 농도값을 나타내었고, 만폭이 좁아지는 St. 3 부근의 농도는 약 2.0mg/L 수준을 유지하는 것으로 나타났으며, 제주항에서 폭이 가장 넓은 지역인 St. 4 부근은 대체적으로 1.5mg/L에서 2.0mg/L의 농도분포를 나타내었다. 전체적인 확산 경향을 보면은 제주항의 부두와 접안시설이 있는 동쪽이 방파제가 있는 서쪽보다 확산이 지형적인 이유로 약해지는 경향을 보인다. 중층과 저층인 경우의 COD 농도분포를 보면 표층과 유사한 확산 경향을 보이고 있으나 확산범위는 저층으로 갈수록 그 정도가 표층에 비해 상대적으로 약해지는 경향을 나타내고 있다. 이러한 확산경향은 산지천에서 유입되는 담수로 인하여 밀도류가 형성되어 표층에서 확산이 많이 되는 것으로 사료된다.

Fig. 17에 제시한 용존무기질소의 분포를 살펴보면 표층의 경우, 제주항 안쪽인 정점 St. 1 부근의 농도는 약 $32\mu\text{g-at/L}$ 에서 $60\mu\text{g-at/L}$ 까지 매우 높은 농도값을 보이고 있으며, 이는 산지천 유입지점에서는 매우 높은 농도로 나타나고 있으나 해역으로 유입되어 물리적인 희석현상으로 인하여 외해로 나갈수록 농도가 낮아지고 있으며, 만 중앙부인 St. 3, 4에서는 약 $7\mu\text{g-at/L}$ 에서 $10\mu\text{g-at/L}$ 의 농도분포로서 제주항내에서 가장 넓은 지역을 차지하고 있다. 중층, 저층의 용존무기질소의 분포를 살펴보면 확산 경향이 유사하게 나타나나 그 범위는 저층으로 갈수록 약해지는 것을 알 수 있으며, 이 현상 역시 COD농도 분포와 유사한 경향을 보였다.

Fig. 18에 제시한 용존무기인의 분포를 살펴보면 표층의 경우, 용존무기질소와 마찬가지로 제주항의 하천유입부쪽에서 약 $2.0\mu\text{g-at/L}$ 에서 $2.9\mu\text{g-at/L}$ 까지 고농도의 분포

를 보이며 급격히 감소하는 경향을 나타내고, 제주항에서 가장 넓은 지역인 정점 St. 4 부근의 농도는 $0.8\mu\text{g-at/L}$ 로 넓게 분포하고 있다. 중층, 저층의 경우도 표층과 유사한 확산 경향을 나타내고 있다.

3.2 모델의 적용가능성 검토

생태계모델의 적용가능성을 검토하기 위해서 5개 정점에서 각 수층별 COD, 용존무기질소 그리고 용존무기인의 실측값과 계산값을 상대오차를 이용하여 비교하였다.

COD의 경우 표층 평균 실측값은 2.73mg/L 로 나타났으며, 평균 계산값은 2.35mg/L 로 나타났고 상대오차는 16.6%였다. 중층과 저층의 경우는 상대오차가 각각 15.4%, 34.5%로 나타났다. 대체적으로 실측치에 비하여 계산치가 낮은 값을 보이고 있으며, 지점별로는 만 입구부의 정점에서 다소 높은 상대오차를 나타내었으나 평균 22.2%로 전체적으로는 COD농도의 상대오차는 양호한 것으로 사료된다.

용존성무기질소의 경우 표층, 중층 그리고 저층의 상대오차가 각각 14.5%, 18.8% 그리고 18.3%로 나타났다. 모든 지점에서 상대오차가 양호하게 나타났으며 평균 17.2%의 오차를 보였다.

용존무기인의 경우 표층, 중층 그리고 저층의 상대오차가 각각 13.4%, 24.8% 그리고 43.0%로 나타났다. 용존무기인은 제주항 중앙부에서는 계산치가 높게 나오고 하천 유입부와 항 입구부에서는 계산치가 실측치보다 대체적으로 낮아지는 경향을 보이고 있으며 평균 27.1%의 오차를 보였다.

이상의 결과를 이용하여 실측치에 대한 계산치가 적합한지를 판단하기 위하여 각 항목별로 단순회귀분석을 실시하여 적합성을 검토하여 유사정도를 검토하였다. 분석 결과 실측치와 계산치의 적합성을 나타내는 결정계수 R^2 (coefficient determination)은 COD의 경우 0.901로 90.1%가 표본회귀선에 적합한 것으로 나타났으며, 용존무기질소의 경우는 0.976, 용존무기인의 경우는 0.806으로 나타나 표본회귀선이 전체자료의 80%이상을 반영하는 것으로 나타났으며, 단순회귀분석과 상대오차에 대한 결과는 Fig. 19에 나타내었다.

이상의 결과로 볼 때 계산치는 실측치와 높은 상관성을 가지며 대상해역의 현황을 적합하게 시뮬레이션된 것으로 사료된다.

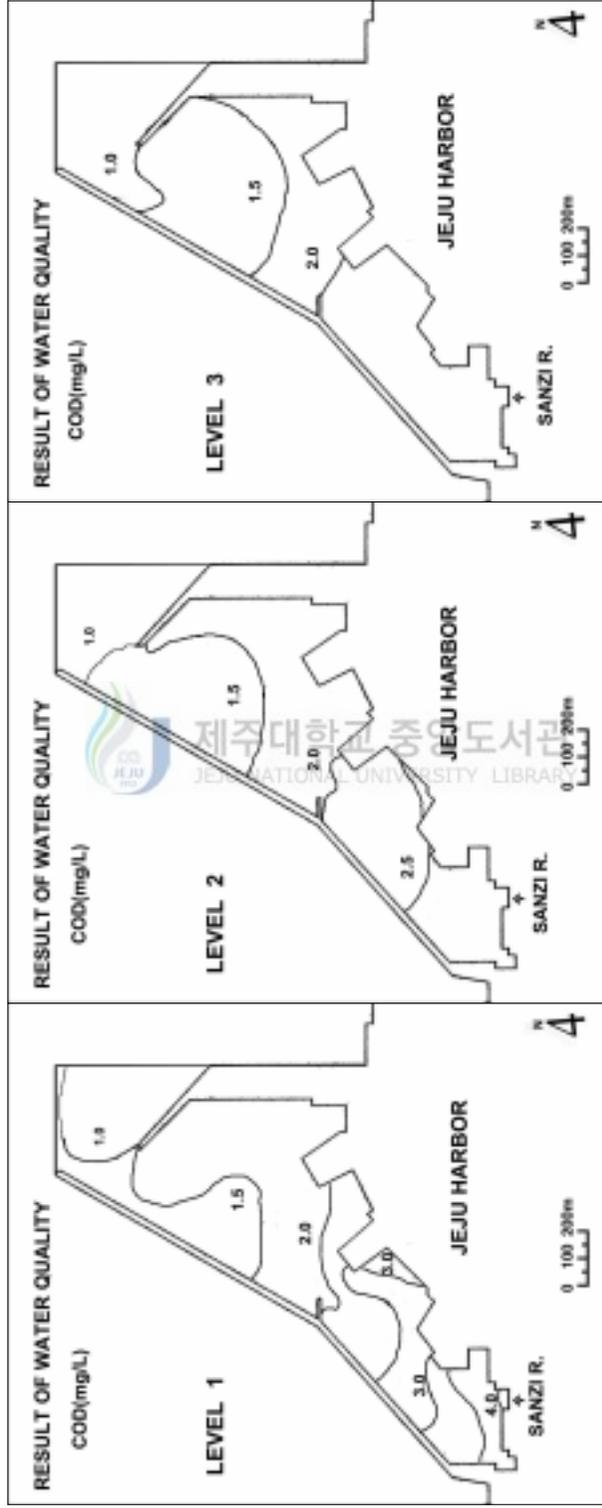


Fig. 16. The distribution of the simulated COD in Jeju Harbor.

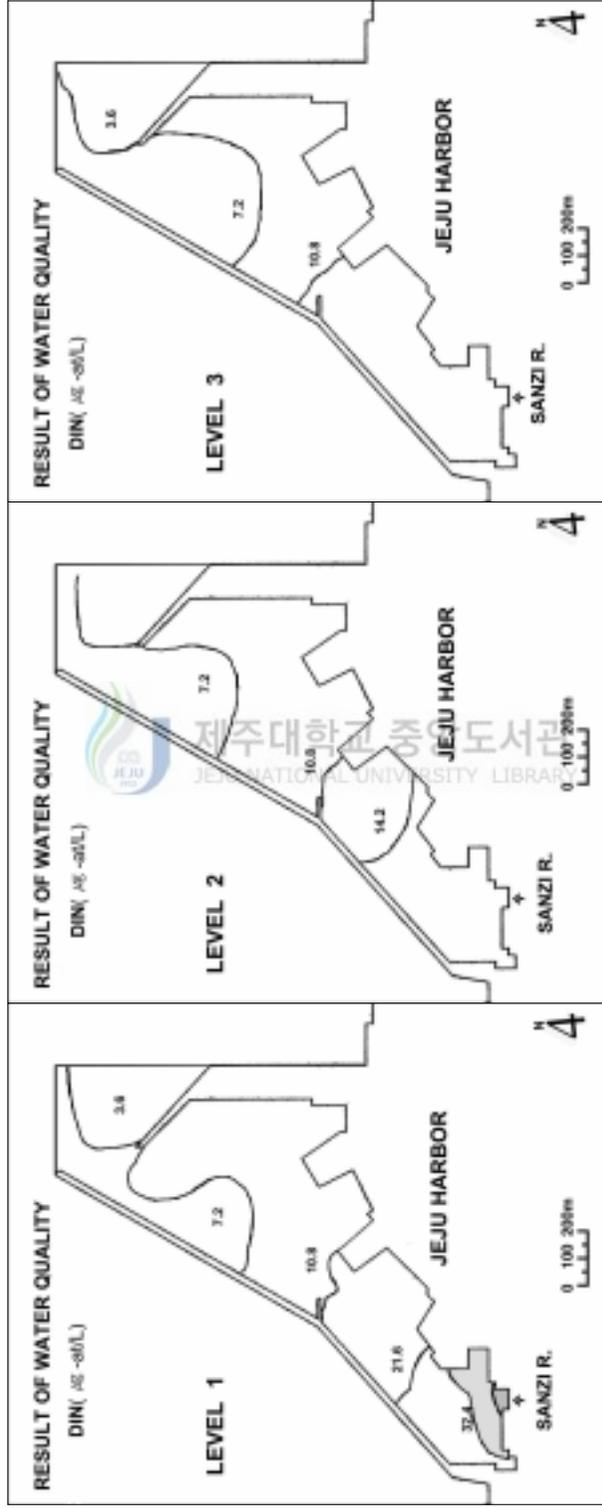


Fig. 17. The distribution of the simulated DIN in Jeju Harbor.

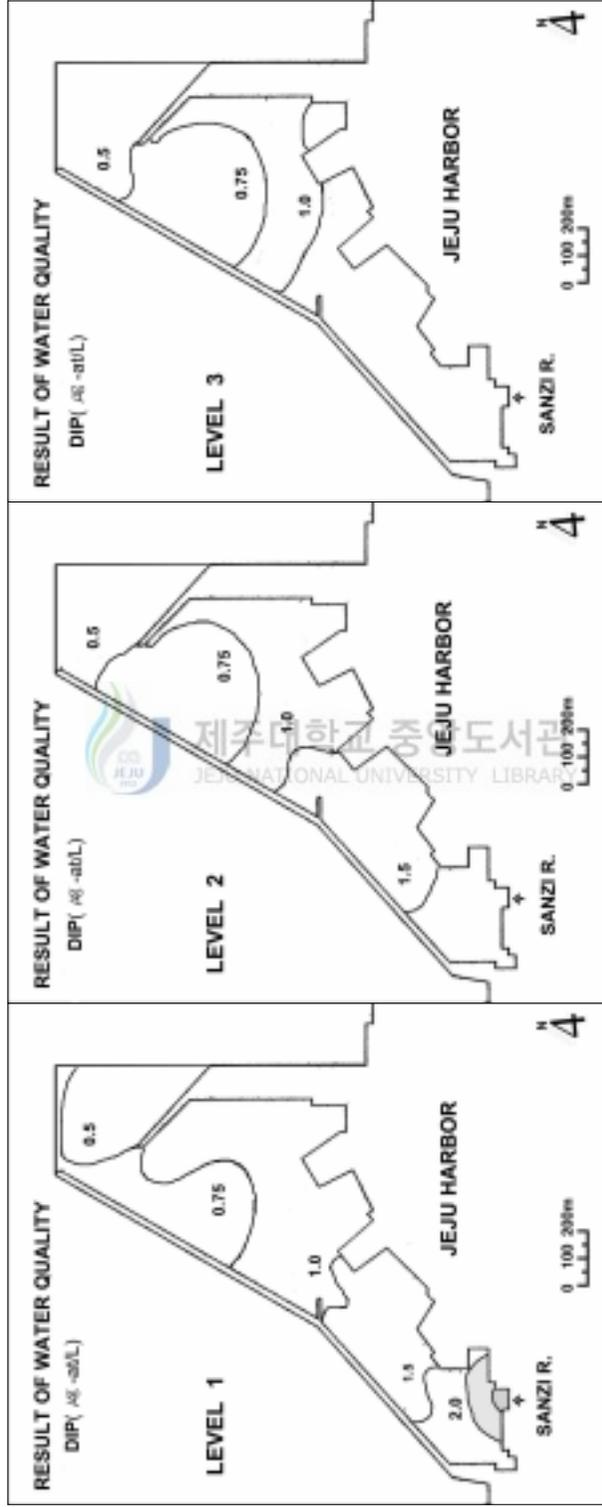


Fig. 18. The distribution of the simulated DIP in Jeju Harbor.

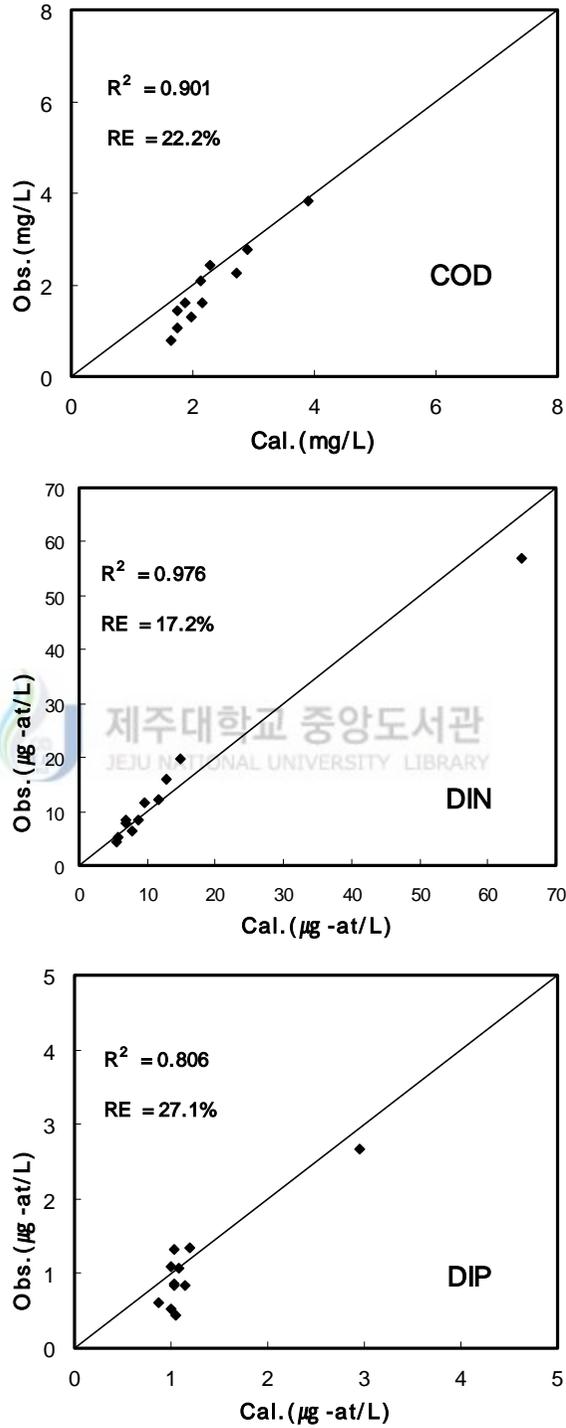


Fig. 19. Comparisons between predicted and observed water quality.

4. 제주항의 수질시뮬레이션

해역의 수질에 영향을 미치는 부영양화현상 등의 진행속도는 해역에서 유입 및 유출되는 영양염의 농도, 해역의 지형 및 물리학적 특성 등과 같은 환경적 인자와, 수질이나 대기와의 영양염 교환 등의 자연적 인자에 영향을 받는다. 이들 요인 중에서 해역의 환경변화에 가장 큰 영향을 주는 인자는 유입 영양염 농도이다.

대상해역의 수질을 예측하고 적절하게 관리하기 위해서는 물질의 유입 및 이동하는 양에 대한 정밀한 평가가 있어야 한다. 즉, 수질예측모델을 이용하여 대상해역에서 적절한 관리대책의 효과를 정량적으로 평가하고 적용할 필요가 있다.

따라서 제주항에서 생태계 모델을 이용하여 COD, 질소 그리고 인의 저감량을 정량적으로 검토하였다. 평가방법으로는 첫 번째로 해역에서 유기오염의 지표인 COD에 대해서 하천오염부하량을 단계적으로 20%, 40%, 60%, 80%, 그리고 100%로 감소시키면서 시뮬레이션하여 COD 농도분포를 각 정점별로 나타내어 오염부하가 제주항에 미치는 영향을 평가하였고, 두 번째로 해역에서의 질소와 인의 주요 공급원으로 외부 부하인 하천에서의 오염부하량과, 내부부하인 저질로부터 용출부하에 대하여 각각 단계적으로 20%, 40%, 60%, 80%, 그리고 100%로 감소시키면서 시뮬레이션하여 제주항에서의 영양염의 농도 분포를 각 정점별로 정량적으로 평가하였고, 세 번째로 제주항의 총부하 즉, 하천오염부하량과 저질용출부하량을 100% 저감시켰을 때 COD, 질소 그리고 인의 농도분포를 시뮬레이션하여 각 정점별로 나타내어 제주항의 수질개선을 위한 방안을 도출하고자 한다. 그 결과를 Fig. 20~24에 나타내었다.

4.1 하천오염부하의 정량적 관리

제주항의 하천유입부하량을 단계적으로 저감시켰을 때, Fig. 20에 나타낸 바와 같이 해역중의 COD농도의 각 정점별 저감은 정점 St. 1에서는 3.8mg/L에서 2.3mg/L까지 단계적으로 감소하여 100% 저감시 39%정도의 저감효과를 보이고, 정점 St. 2에서는 2.8mg/L에서 2.2mg/L까지 약 21%의 저감 효과를 보이나 그 외의 정점에서 7%미만의 미미한 제거효과를 나타내어 해역에서 유기오염의 지표인 COD에 대한 하천오염

부하의 영향은 하천유입부에서 어느 정도의 영향을 미치나 만 중앙부와 만 유입부로 갈수록 저감효과가 크게 감소하여 한정된 영향범위를 나타내고 있다.

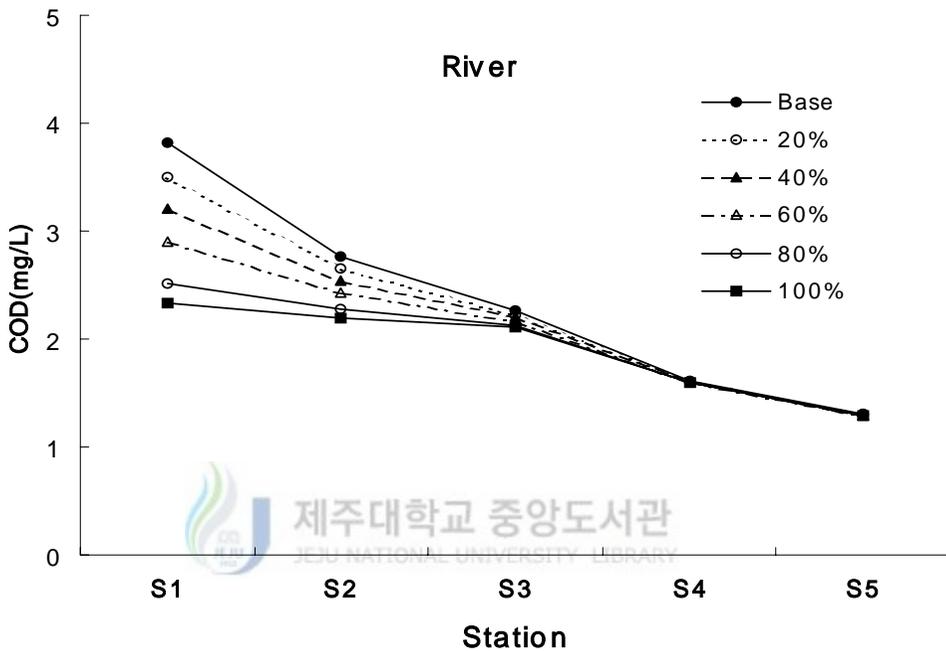


Fig. 20. The predictions of COD depending on pollution load reductions from the river under the present condition.

Fig. 21에 나타난 하천유입부하량을 단계적으로 감소시켰을 때 제주항의 각 정점별 질소의 저감효과를 보면, 정점 St. 1에서는 $56.8\mu\text{g-at/L}$ 에서 $12.4\mu\text{g-at/L}$ 까지 단계적으로 감소하여 100% 저감시 78%의 저감효과를 보이고 부하량의 60%정도만 제거해도 약 50%의 상대적으로 큰 저감효과를 보인다. 정점 St. 2에서는 $19.7\mu\text{g-at/L}$ 에서 $11.4\mu\text{g-at/L}$ 까지 단계적으로 감소하여 100% 저감시 42%의 저감효과를 보이고, 정점 St. 3에서는 17%가 저감되나 그 외의 정점에서는 외부부하의 한정된 영향범위를 나타내어 만 유입부로 갈수록 3% 미만의 적은 저감효과를 보이고 있다. 이 결과로 육상기원 물질인 질소의 제주항내로 유입을 방지함으로써 하천유입부의 수질개선에 큰 영향을 줄 수 있는 것으로 사료된다.

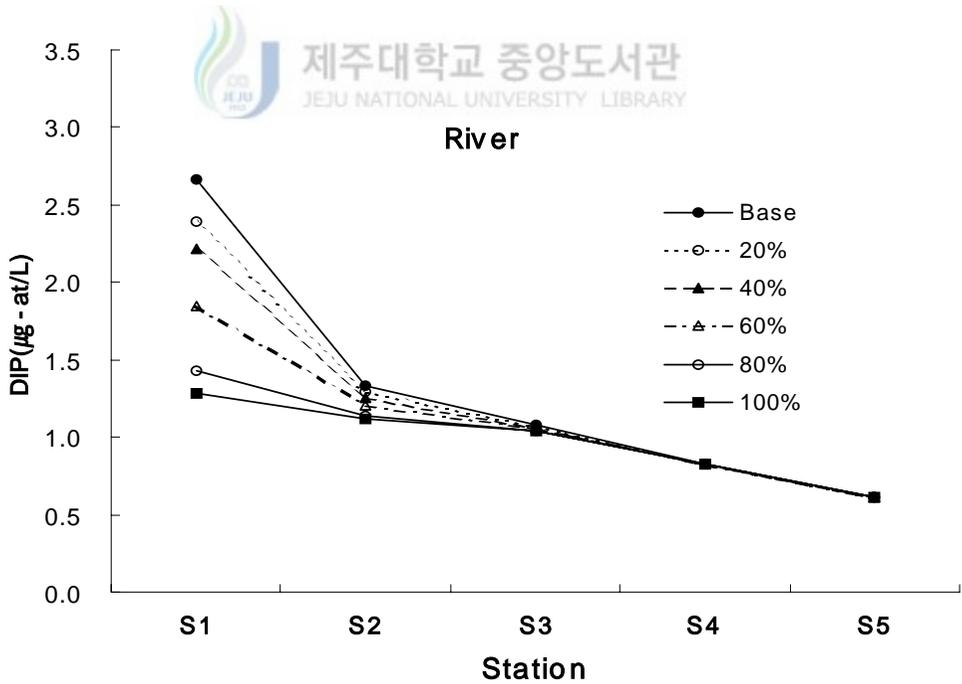
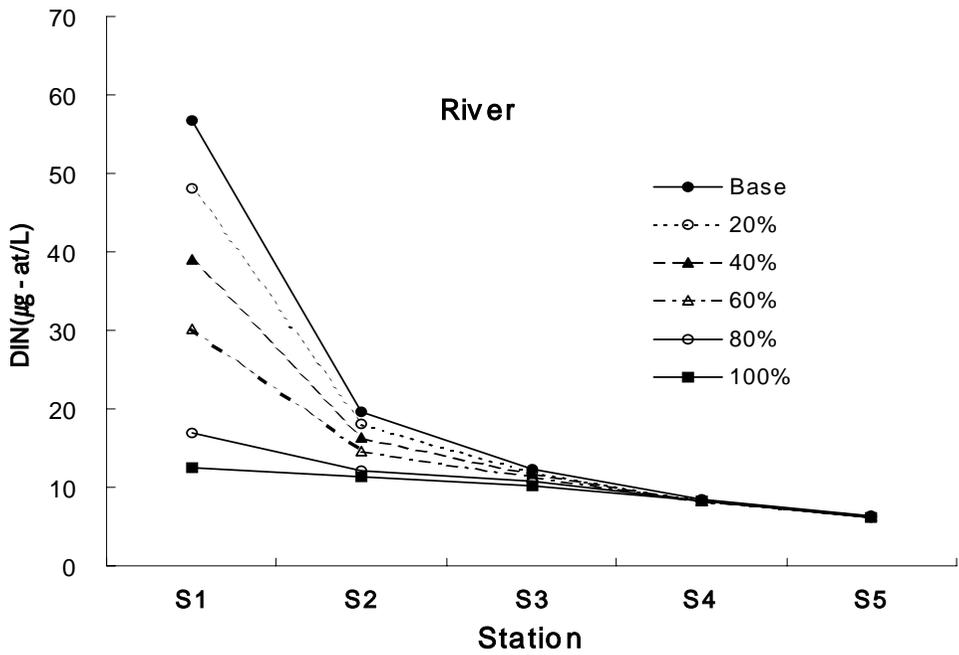


Fig. 21. The predictions of DIP and DIN depending on various nutrient loads reduction from the river under the present condition.

Fig. 21에 나타난 하천유입부하량을 단계적으로 감소시켰을 때의 대상해역내 각 정점별 인의 저감효과를 보면, 정점 St. 1에서는 $2.7\mu\text{g-at/L}$ 에서 $1.3\mu\text{g-at/L}$ 까지 단계적으로 감소하여 100% 저감시 52%의 저감효과를 보이고, 정점 St. 2에서는 $1.3\mu\text{g-at/L}$ 에서 $1.1\mu\text{g-at/L}$ 까지 단계적으로 감소하여 100% 저감시 16%의 저감효과를 보이나, 그 외의 정점에서는 외부부하의 한정된 영향범위를 나타내어 만 유입부로 갈수록 4% 미만의 적은 저감효과를 보여 COD, 질소와 유사한 경향을 나타내고 있다.

이상의 결과를 보면, 외부부하인 하천유입부하량의 감소에 의한 제주항내 오염물질 농도의 저감효과는 만 중앙부에서 만 외로 갈수록 그 영향범위가 미비하나 하천유입부에 한정되어 큰 효과를 나타내고 있어 제주항내로 오염부하의 유입을 방지함으로써 제주항의 하천유입부 수질개선에 큰 영향을 줄 수 있는 것으로 사료된다.

4.2 저질 영양염 용출부하의 정량적 관리

저질의 영양염 용출부하를 단계적으로 20%, 40%, 60%, 80% 그리고 100% 저감시켰을 때, 각 정점에서 영양염 농도의 변화는 Fig. 22에 나타내었다. 질소의 경우 정점 St. 1에서는 100% 부하 감소시 하천유입부의 질소는 4.8%, St. 2에서는 10.5%의 저감효과를 보여 하천유입부하의 감소에 의한 효과에 비해 상대적으로 낮은 값을 나타내었고, 정점 St.4에서 $8.4\mu\text{g-at/L}$ 에서 $6.9\mu\text{g-at/L}$ 까지 단계적으로 감소하여 100% 저감시 17.5%의 저감효과를 보이며 이 결과는 하천유입부하를 감소시켰을 때의 미미한 효과에 비해 증가한 경향을 나타내어 용출부하를 80%정도 저감했을 때 질소의 농도는 해역기준 III등급에서 II등급으로 수질이 개선되는 효과를 나타내었다.

저질의 인 용출부하를 단계적으로 20%, 40%, 60%, 80% 그리고 100% 감소시켜 각 정점에서 인의 농도 분포를 살펴보면, 정점 St. 1에서는 $2.7\mu\text{g-at/L}$ 에서 $2.1\mu\text{g-at/L}$ 까지 감소하여 100%부하를 저감해도 20.8%의 저감효과를 나타내어 하천부하량을 감소시켰을 때의 52%보다는 상대적으로 작은 효과를 나타냈지만, 그 외의 정점 St.2, 3, 4 그리고 St. 5에서는 용출부하량의 감소에 따라 단계적으로 저감효과가 상승하는 경향을 나타내어 100% 저감시 각각 30.7%, 31.4%, 38.6% 그리고 28.3%로 나타났다. 정점 St. 4에서는 용출부하를 100% 저감시 III등급에서 II등급으로 수질이 개선되는 효과를 나타내었으며, 정점 St. 5에서는 내부부하인 저질용출부하를 60%정도 저감하여도 해

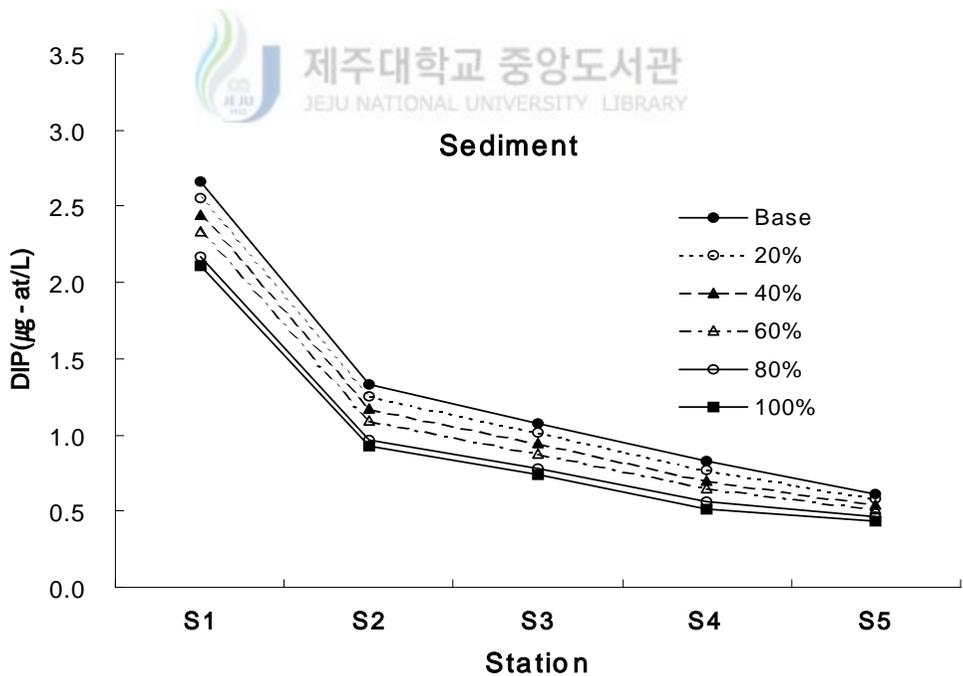
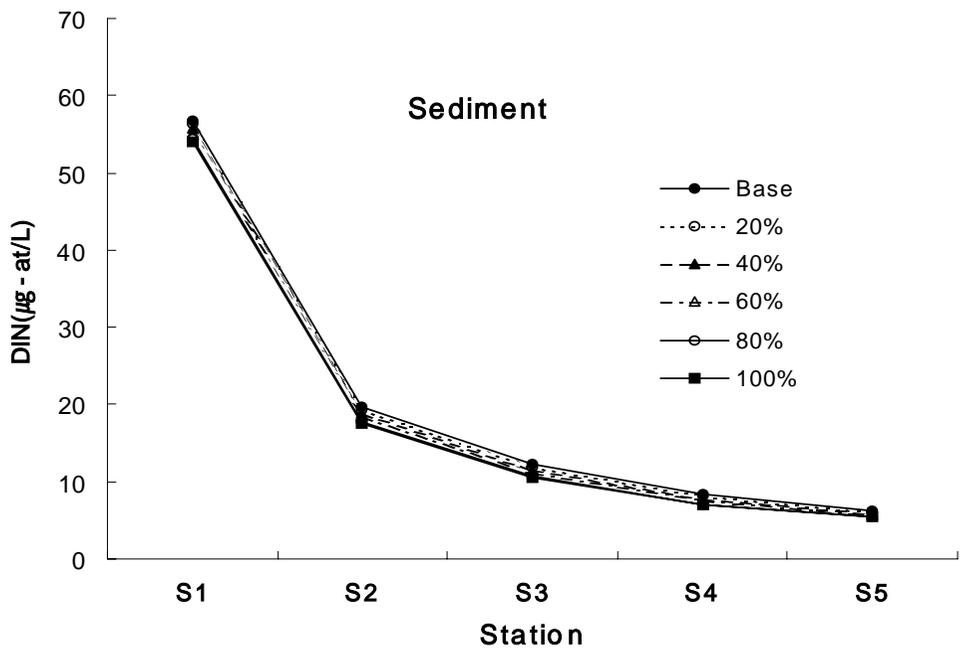


Fig. 22. The predictions of DIP and DIN depending on various sediment flux rate under the present condition.

역기준 II등급 이하의 수질을 유지하면서 만 외로 유출되는 경향을 나타내었다.

이상의 결과를 보면, 내부부하인 저질영양염 용출부하를 감소했을 경우의 제주항내 영양염농도의 저감효과는 하천유입부하량의 저감시와 상대적으로 비교하여 제주항의 하천유입부보다는 만중양부나 만 유입부의 수질개선에 효율적인 영향을 보이는 것으로 사료되며 특히, 인의 경우 그 양상이 잘 나타났으며 제주항의 수질특성과 잘 일치하는 것으로 사료된다.

4.3 수질 및 저질관리

제주항에서 조류성장에 필요한 영양염에 대한 제한인자는 조사된 영양염류 N/P비를 기준하여 보았을 때, 해역의 육상기원물질의 영향을 받는 정점 St. 1은 인이 제한인자이지만, 그 외의 대부분의 정점에서는 제주항 내에서 식물플랑크톤 성장의 제한인자는 질소인 것으로 나타났다.

질소와 인의 주요 공급원인 하천에서의 오염부하량과, 저질로부터 용출부하에 대하여 각각 100% 저감시켰을 때와 부하량 전체를 저감시켰을 경우를 비교하여 Fig. 24에 각 지점별 영양염농도의 분포를 나타내었으며, COD의 경우도 하천부하량을 단계적으로 감소시켰을 때의 저감효과와 전체적으로 하천부하와 저질부하를 같이 100% 저감했을 때를 비교하여 각 지점별 농도분포를 Fig. 23에 나타내었다.

하천과 저질의 총부하량을 100% 감소했을 경우 COD의 농도분포는 하천유입부인 정점 St. 1에서 3.8mg/L에서 2.2mg/L 정도로 약 43%정도의 저감효과를 나타내어 하천오염부하량만을 감소했을 때 보다는 저감효과가 증가하였지만 뚜렷한 경향을 보이지는 않았으며, 정점 St. 2에서는 2.8mg/L에서 2.0mg/L 정도로 약 26%정도의 저감효과를 나타내어 COD농도가 해역수질기준 II등급 이하로 개선되었다. 그리고 정점 St. 3에서는 하천오염부하만을 감소했을 경우 보다 저감효과가 2배 정도 증가하는 경향을 나타내었다.

이와 같은 결과로 현재 해역수질기준 III등급인 제주항내에서 전체적으로 II등급 이하를 유지하기 위해서는 하천유입부하량의 저감을 통한 수질개선만으로는 부족하며 제주항내로 유입하는 총부하의 저감을 통한 접근이 필요하다고 사료된다.

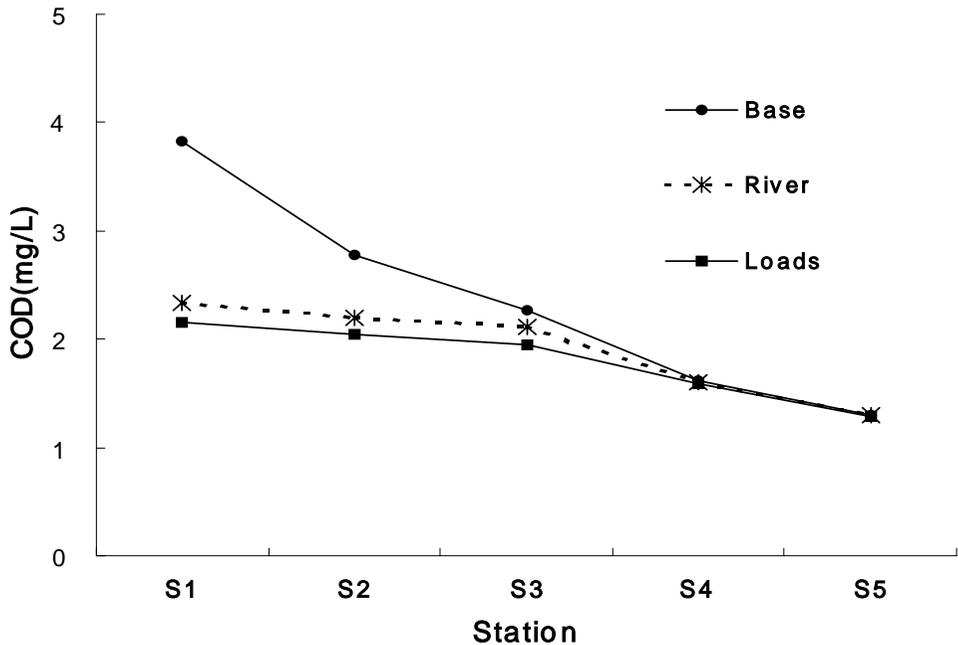


Fig. 23. The predictions of COD depending on pollution loads reduction in the model area under the present condition.

용존무기질소의 경우를 살펴보면, Fig. 24에 나타난 바와 같이 하천유입부인 정점 St. 1, 2에서 하천오염부하를 저감하였을 때 질소의 제거가 78~50%로 용출부하에 비해 큰 효과를 나타내었으나, 이에 반해 정점 St. 3에서 만 외로 갈수록은 용출부하의 저감에 의한 저감효과가 크다는 것을 나타내고 있으며 용출부하 80% 저감시 정점 St. 4에서 해역수질기준 II등급($7.14\mu\text{g-at/L}$ 이하)을 유지하는 것으로 나타났다. 총부하량을 100% 저감시켰을 경우 하천유입부인 정점 St. 1에서 질소의 농도가 $56.8\mu\text{g-at/L}$ 에서 $9.0\mu\text{g-at/L}$ 까지 감소하여 약 85%의 가장 큰 저감효과를 보였으며, 정점 St.2에서는 $19.7\mu\text{g-at/L}$ 에서 $9.0\mu\text{g-at/L}$ 까지 감소하여 약 54%의 저감효과를 나타내었고, 그 외의 정점 St. 3, 4 그리고 St. 5에서 각각 31%, 24% 그리고 16%의 제거효과를 나타내어 하천유입부하와 저질용출부하를 각각 따로 저감했을 경우에 비해 전체적으로 저감효율이 상승하고 있으며, 이러한 결과는 만 중앙부에서 만 유입부로 갈수록 그 경향이 잘 나타나고 있다. 이와 같은 결과로 총부하를 저감시켰을 때 제주항내의 질소농도는

정점 St. 3이후로 해역수질기준 II등급을 유지되는 수질개선 효과를 나타내었다.

용존무기인의 경우를 보면, 각각 유입하천부하와 저질용출부하의 저감에 의한 제주항내의 각 정점별 인의 농도분포에 상대적으로 큰 비중의 영향을 주는 부하를 비교하면은 Fig. 24에 나타난 바와 같이 정점 St. 1은 유입하천부하를 100% 저감시켰을 때 52%의 효과를 나타내어 21%의 용출부하 저감에 의한 영향보다는 크게 나타났으나, 반면에 정점 St. 2, 3, 4 그리고 St. 5에서의 용출부하 저감시가 유입하천부하의 경우보다 각각 정점별로 15%, 28%, 38% 그리고 28%의 차이를 보여 저감효과가 상승하는 경향을 나타내었으며, 용출부하를 약 60%정도 저감시 정점 St. 5에서 만 외부로 갈수록 해역수질기준 II등급($0.48\mu\text{g-at/L}$ 이하) 이하를 유지하여 유출되는 경향을 나타내었다. 총부하량을 100% 저감시켰을 경우를 보면, 하천유입부하인 정점 St. 1에서 인의 농도가 $2.66\mu\text{g-at/L}$ 에서 $0.66\mu\text{g-at/L}$ 까지 감소하여 약75%의 가장 큰 저감효과를 보였고, 정점 St. 2에서는 $1.34\mu\text{g-at/L}$ 에서 $0.67\mu\text{g-at/L}$ 까지 감소하여 약 50%의 저감효과를 나타내었으며, 그 외의 정점 St. 3, 4 그리고 St. 5에서 각각 36%, 40% 그리고 29%의 저감효과를 나타내었다. 이 결과는 하천유입부하와 저질용출부하를 각각 따로 저감했을 경우에 비해 전체적으로 저감효율이 상승하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 이와 같은 결과로 총부하를 저감시켰을 때 제주항내의 용존무기인 농도는 정점 St. 4이후로 해역수질기준 II등급 이하로 유지되는 수질개선 효과를 나타내었다.

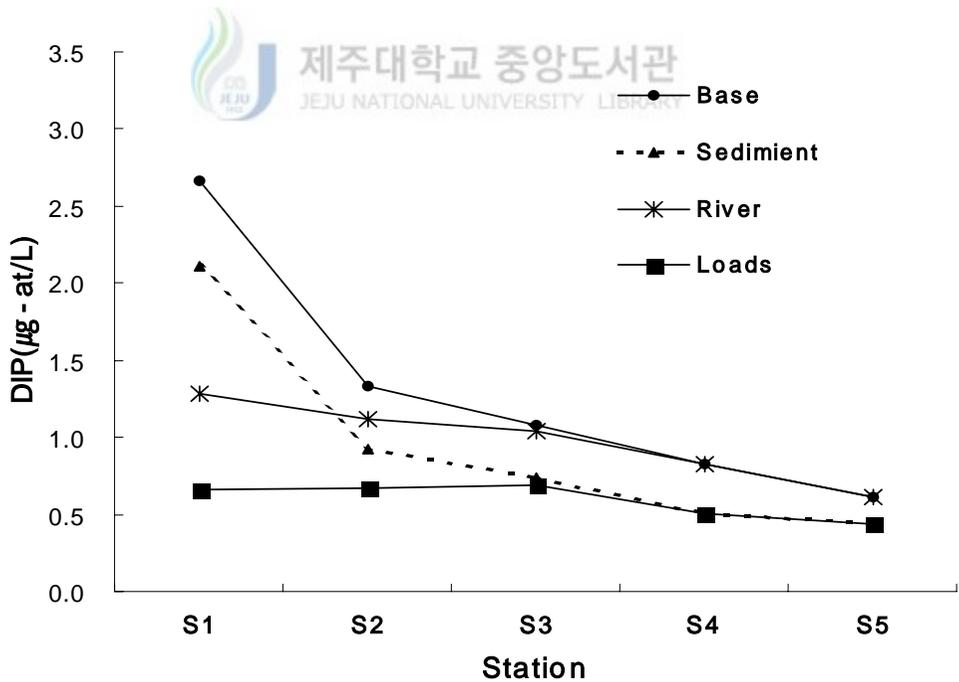
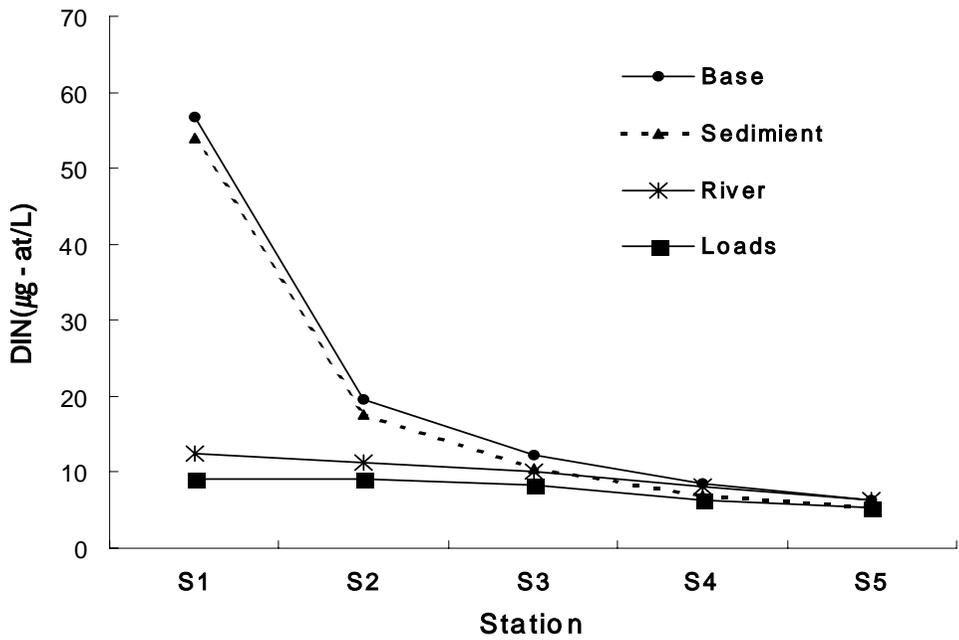


Fig. 24. The predictions of DIP and DIN depending on pollution loads reduction in the model area under the present condition.

V. 결론

제주항을 대상해역으로 해양수질환경특성과 유입오염부하량을 조사하고 해수유동모델과 생태계 모델로 구성된 물질순환모델을 이용하여, 해수유동특성과 COD, 영양염의 농도분포를 시뮬레이션하였다. 이 결과를 이용하여 해역의 수질개선대책으로 하천오염부하 감소와 저질개선을 통한 용출부하 감소에 따른 COD, 영양염의 농도를 정량적으로 평가한 후 제주항의 수질개선을 위한 저감방안을 도출한 결과는 다음과 같다.

1) 제주항의 수질환경은 COD가 1.00~4.85mg/L(평균 2.15mg/L), 용존무기인이 0.52~4.00 $\mu\text{g-at/L}$ (평균 1.18 $\mu\text{g-at/L}$), 용존무기질소가 2.14~74.0 $\mu\text{g-at/L}$ (평균 12.20 $\mu\text{g-at/L}$)로 전체적으로 해역수질기준 III등급을 초과하였고, N/P비는 산지천 하구역을 제외한 대부분의 정점에서 16이하를 나타내어 제주항내에서 식물성장의 제한인자는 질소인 것으로 조사되었다.



2) 제주항의 해수유동모델을 시뮬레이션한 결과, 관측치와 계산치를 비교해보면 만의 중앙부에서 약간의 유향의 차이를 보이는 것을 제외하고는 잘 일치됨을 보여 제주항의 유동장을 잘 나타내고 있음을 알 수 있었다. 조류분포 특성의 경우 항만 입구부에서 30~40cm/s의 강한 유속대를 보이고 있으나 제주항의 수심이 대체적으로 얕고 조석이 강함으로 인하여 창조류와 낙조류의 위상이 반대인 것 외에는 거의 같은 유속 분포를 보이고 있다.

3) 잔차류의 패턴을 보면, 지형적 특성과 밀도류에 의해 만입구부와 중앙부에서 강한 와류가 형성되었고, 저층으로 갈수록 밀도류 성분이 약화로 잔차류가 하구쪽으로 향하면서 오염물질이 외해로 유출되지 못하고, 점차적으로 하구 내만에 축적되는 것으로 관측되었다.

4) 생태계 모델을 이용하여 제주항의 수질을 시뮬레이션한 결과, 하천유입부에서의 계산치가 실측치의 농도보다 낮게 나타나는 경향을 보였다. 실측치와 계산치의 관계정도를 나타내는 상관계수는 COD의 경우 0.901, 용존무기질소의 경우는 0.976, 용존무기인의 경우는 0.806으로 나타나 표본회귀선이 전체자료의 80%이상을 반영하는 것으로 나타나 계산치는 실측치와 높은 상관성을 가지며 이 결과를 볼 때 제주항의 물질분포를 적합하게 시뮬레이션된 것으로 사료된다.

시뮬레이션된 제주항의 COD, 영양염의 물질분포를 보면, 산지천 유입지점에서는 매우 높은 농도로 나타나고 있으나 해역으로 유입되어 외해로 갈수록 농도가 낮아지는 경향을 보이고, 각 층별로 유사한 확산경향을 보이거나 저층으로 갈수록 담수유입에 의한 밀도류의 약화로 확산범위는 표층에 비해 약해지는 경향을 보였다.

5) 하천유입부하량과 저질용출부하량을 각각 단계적으로 저감시켜 생태계모델을 시뮬레이션한 결과를 보면, 하천유입부하량을 저감시켰을 때 하천유입부에서의 용존무기질소와 용존무기인의 저감효과가 각각 78%, 52%로 나타났으나 만 중앙부에서부터는 그 효과가 낮았다. 이에 반해 저질용출부하량을 저감시켰을 때 영양염농도의 저감효과는 만 중앙부에서 상대적으로 증가하는 경향이 나타났다. 하천과 저질의 총부하를 95%이상 저감시켰을 때 제주항의 COD와 영양염농도가 만 중앙부에서부터 해역수질기준 II등급 이하로 수질이 개선되었다.

이와 같은 결과로 현재 해역수질기준 III등급인 제주항내에서 전체적으로 II등급 이하를 유지하기 위해서는 하천유입부하의 저감을 통한 수질개선만으로는 어렵고 하천유입부하와 저질용출부하를 함께 고려한 제주항내로 유입하는 총부하의 저감을 통한 접근이 필요하다고 사료된다.

VI. 참고문헌

- 제주도, 1997, 환경백서, p42.
- 제주도, 1997, 제주도 친환경개발을 위한 환경지표설정, p238.
- 제주시, 2000, 산지천 정비 기본 및 실시설계 종합보고서.
- 제주지방해양수산청, 1998, 제주항 어항분구 실시설계용역.
- 제주지방해양수산청, 2000, 제주외항 방파제축조 실시설계용역.
- 해양수산부, 1999, 해양환경보전 국가기본전략 수립연구, pp.1~79.
- 조은일·박청길, 1998, 제주도 항만의 수질특성 및 예측, 제주대 해양연구논문집 제22권, pp.163~171.
- 조은일·오윤근, 1998, 제주도 우수하천에 대한 수질특성 및 오염부하량 산정, 한국환경과학회지 제7권 6호, pp.845~851.
- 김종구 외 2인, 2002, 새만금 사업지구의 연안해역에서 부영양화관리를 위한 생태계모델의 적용(2), 한국수산학회지 제 35권 제 4호, pp.356~365.
- 신범·이준백, 2002, 제주 중문연안역의 초미세, 미소, 소형플랑크톤 시·공간적분포 한국해양학회지 제7권 2호, pp.78~86.
- 김광수·최영찬, 2000, 생태계모델을 이용한 제주도 남부해역의 환경용량산정, 한국해양환경공학회지 제3권 1호, pp.52~61.
- 양성기·최찬문, 1999, 제주항의 해양수리학적 특성, 제주대 해양연구논문집 제 23권, pp.9~21.
- 김상현 외 2인, 1998, 제주도 북부연안역의 해황과 조석전선 특성, 한국수산학회지 제 31권 3호, pp.437~446.
- 양진우, 1990, 낙동강 하구역에서의 인의 침강 및 용출특성, 부산수산대학교 대학원 석사학위논문, pp.1~52.
- 최우정, 1993, 진해만의 빈산소수괴 형성에 관한 시뮬레이션, 부산수산대학교 대학원 박사학위논문, pp.1~97.
- 최영찬, 1991, 낙동강 하류의 부영양화 모델링에 관한 연구, 부산수산대학교 대학원

- 박사학위논문, pp.1~130.
- 김종구, 1994, 진해만 해역의 하계 부영양화 모델링, 부산수산대학교 대학원 박사학위논문, pp.1~130.
- 조은일, 1996, 생태계모델을 이용한 어장환경용량 산정, 부산수산대학교 대학원 박사학위논문, pp.1~139.
- 김동명, 1999, 생태계모델을 이용한 황해의 부영양화 모델링. 부경대학교 대학원 박사학위논문, pp.1~135.
- 이대인, 2000, 낙동강 하구해역의 식물플랑크톤 극대역 변동에 관한 수치시뮬레이션, 부경대학교 대학원 박사학위논문, pp.1~131.
- 한국해양연구소, 1996, 한반도 주변 조석 조화상수 자료집
- 동화기술, 2000, 수질오염 공정시험방법주해
- 국립수산진흥원, 1997, 해양환경공정시험방법
- 國立環境研究院, 1991, 全國 主要沿岸 流入汚染負荷量 算定에 關한 調査研究, p.71.
- 濟州道, 1994, 濟州道 綜合開發計劃, p.531.
- 西村 肇, 1976, 環境容量の概念について, 海洋科學, pp.42~45.
- 堀江 毅, 1990, 海域の水質・生態系の數値モデル, 土木學會論文集 第417號/Ⅱ-13, pp.21~31.
- 中田喜三郎·石川公敏·松川康夫, 1985, 內灣の流動場の數値實驗, 沿岸海洋ノート 27(2), pp.96~108.
- 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. 沿岸海洋ノート 28(2), pp.140~158.
- 堀口孝男 · 富田 勇 · 堀江 毅, 1977, 三次元モデルによる流れと擴散 數値解法, 第24回 沿岸工學講演會論文集, pp.443~447.
- 柳哲雄, 1989, シンポジウム貧酸素水塊のまとめ, 沿岸海洋研究ノート 26(2), p.141~145.
- 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, 沿岸海洋ノート 28(2), pp.140~158.
- 田中庸央·佐野方昂, 1980, 三河灣における植物プランクトンの一次生産動態に關する一考察, 日本プランクトン學會報 27(2), pp.75~85.
- 日本水産資源保護協會, 1989, 漁場環境容量 策定事業 報告書, 制1分冊.

- 日本水産資源保護協會, 1990, IV. 貧酸素水塊についてモデリング, 漁場環境容量策定事業.
- 村上 健, 1975, 底泥中の有機物質 水質汚濁. 公害と 対策 11, pp.1~7.
- 畑 辛彦, 底土における自浄作用, 일본수산학회 수산학 시리즈 30, 水域의 自浄作用 と 淨化
- Fillos. J. and W. R. Swason, 1975, The release rate of nutrients from river and lake sediments, J. WPCF 47(5), pp.1032~1042.
- Amemiya, I. 1928, Ecological studies of Japanese oyster, with special reference to the salinity of their habitats. J. Coll. Agr. Imp. Tokyo, 9, pp.333~382.
- Baca, R. G., R. C. Arnett, 1976, A limnological model for eutrophic lakes and impoundments. Battelee, Inc., Pacific Northwest laboratories, Richland, Washington.
- Bansal, M. K. 1975, Deoxygenation in natural streams. Water Res. Bull. 11, p.491.
- Brown, T. E., F. L. Richardson, 1968, The effect of growth environment of the physiology of algae by light intensity. J. Phycol. 4, pp.38~45.
- Butler, E. and F. R. S. Marshall, 1969, On the nutrition and metabolism of zooplankton, VII. Seasonal survey of nitrogen and phosphorus excretion by *Calanus* on the Clyde sea area. J. Mar. Biol., Ass. UK. 50, pp.525-560.
- Conover, R. J. 1966, Factors affecting the assimilation of organic matter by zooplankton and question of superfluous feeding. Limnol. Oceanogr. 11, p.1346.
- Di Toro, D. M. and J. F. Connolly, 1980, Mathematical models of water quality in large lakes, Part II. Lake Erie. U.S. Environmental Protection Agency, Ecological Research Series, EPA-600/3-80-065.
- Di Toro, D. M., D. J. O'Connor and R.V. Thomann, 1971, A dynamic model of the phytoplankton population in the Sacramento-San Joaquin delta. Advances in chemistry series, p.106.
- Eppley, R. W. 1972, Temperature and phytoplankton growth in the sea. Fish. Bull., 70, pp.1063~1082.
- Eppley, R. W. and P. R. Sloan, 1965, Carbon balance experiments with marine

- phytoplankton. J. Fish. Res. Bd. Canada, 25, pp.1083~1097.
- Eppley, R. W., E. H. Renger, E. L. Venrick and M. M. Mullin, 1973, A study of phytoplankton dynamics and nutrient cycling in the central gyre of the North Pacific Ocean. *Limnol. Oceanogr.*, 18(4), pp.534~551.
- Fee, E. J. 1976, The vertical and seasonal distribution of chlorophyll-a in lakes of the Experimental Lakes Area, northwestern Ontario : Implication for primary production estimates. *Limnol. Oceanogr.*, 21, pp.767~783.
- Horiya, K., T. Hirano and M. Hosoda, 1991, Evaluating method of the marine environmental capacity for coastal fisheries and its application to Osaka Bay. *Mar. Pollution Bull.*, 23, pp.253~257.
- Hunter, B. L. and E. A. Laws, 1981, ATP and chlorophyll a as estimators of phytoplankton carbon biomass. *Limnol. Ocenogr.*, 26(5), pp.944~956.
- Ikushima, I. 1967, Ecological studies on the productivity of aquatic plant communities III, Effect of depth on daily photosynthesis in submerged macrophytes. *Bot. Mag., Tokyo*, 80, pp.57~67.
- Ishkawa, M. and H. Nishmura, 1983, A new method of evaluating the mineralization of particulate and dissolved photoassimilated organic matter. *J. Oceanogr. soc. Japan*, 39, pp.29~42.
- Ivlev, V. S. 1945, The biological productivity of waters. *Usp. Sovrem. Biol.*, 19, pp.98~120.
- Jorgensen, S. E. 1979, Handbook of environmental data and ecological parameters. International Society for Ecological Modeling.
- Kishi, M. J., S. Kimura, H. Nakata, and Y. Yamashita, 1991, A biomass-based model for the sand lance(*Ammodytes personatus*) in Seto Inland Sea. Japan. *Ecol. Model*, 54, pp.247~263.
- Kishi, M. J., Y. Iwata and M. Uchiyama, 1991, Numerical simulation model for quantitative management of mariculture. *Mar. pollution Bull.*, 23, pp.765~767.
- O'Connor D. J., R. V. Thomann D. M. Di Toro, 1973, Water quality forecasting and management. Office of Reserch and Development U.S. EPA, Corvallis, Oregon.

- Parsons, T. R., R. J. Lebrasseur and J. D. Fulton, 1967, Some observations on the dependence of zooplankton grazing on the cell size and concentration of phytoplankton bloom. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 23, pp.10~17.
- Perry, M. J. 1976, Phosphate utilization by an oceanic diatom in phosphorus-limited chemostat culture and in the in the oligotrophic waters of the central north Pacific. *Limnol. Oceanogr.*, 21, pp.88~107.
- Richey, J. E. 1977, in: Hall, C.A.S. and J. W. Day, Jr.(eds.); *Ecosystem modeling in theory and practice*. John Wiley and Sons. N.Y.
- Salisbury, D. K., J. V. DePinto and T. C. Young, 1983, Impact of algal available phosphorus on Lake Erie Water Quality: Mathematical modeling for U.S. EPA, Environmental Research Laboratory, Duluth, Minnesota.
- Scavia, D. and B. J. Eadie, 1976, *Ecol. Model*, pp.315~319.
- Stockner, J. G. and N. J. Antia, 1986, Algal picoplankton from marine and freshwater ecosystems: A multidisciplinary perspective. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 43, pp.2472~2503.
- Takahashi, M. and P. K. Bienfang, 1983, Size structure of phytoplankton biomass and photosynthesis in subtropical Hawaiian waters. *Mar. Biol.*, 76, 203~211.
- Thomann, R. V., D. M. Di Toro, R. P. Winfield and D. J. O'Connor, 1975, Mathematical modeling of phytoplankton in lake Ontario, Part 1. Model development and verification. Manhattan college, Bronx, New York, For US-EPA, Corvallis, Oregon, EPA-600/3-75-005.
- Thomann, R. V., J. Segna, and R. Winfield, 1979, Verification analysis of Lake Ontario and Rochester Embayment three-dimensional eutrophication model. Manhattan College, Bronx, New York. For EPA, Office of Research and Development, Duluth, Minnesota.
- Thomas, W. H. and A. N. Dodson, 1972, On nitrogen deficiency in tropical Pacific Oceanic phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 17(4), pp.515~523.
- Watt, W. D.(1966): Release of dissolved organic material from the cells of phytoplankton populations. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. B.*, 164, pp.521~551.