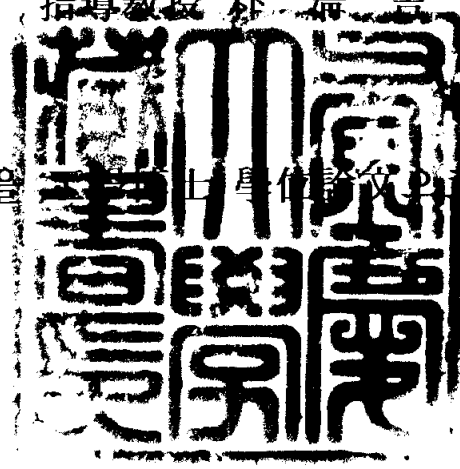
工學博士 學位論文

南海岸의 有害赤潮發生에 관한 生態系 모델링

指導敎授 朴 淸 吉



이 論文을 博士 學位論文으로 提出함

2004年 2月

釜慶大學校 大學院

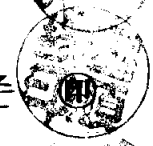
環 境 工 學 科

洪 碩 振

洪碩振의 工學博士 學位論文을 認准함

2003年 12月 日

主 審 工學博士 이 석 모

副 審 工學博士 여 석 준 

委 員 工學博士 강 임 석

委 員 工學博士 최 우 정

委 員 理學博士 박 청 길

List

List of Tables VI

List of Figures VII

Abstract IX

Ⅰ. 서론 1

Ⅱ. 이론적 배경 7

2.1 생태 유체역학 모델 7

2.2 해수유동모델 8

2.2.1 해수유동모델의 개요 8

2.2.2 해수유동모델의 전제조건 8

2.2.3 해수유동모델의 기본방정식 10

2.2.4 층간 동역학 12

2.2.5 경계조건 14

2.2.6 수치계산 17

2.3. 생태계모델 21

2.3.1 생태계모델의 개요 21

2.3.2 생물과정의 수식화 23

2.3.3 생태계 모델의 이산화 45

2.3.4 생물 parameters 48

Ⅲ. 재료 및 방법 50

3.1 대상해역 및 현장관측 50

3.2 해수유동장의 재현 51

3.2.1 Model 영역 51
3.2.2 해수유동모델의 입력자료 53
3.2.3 시간변동에 따른 유동장의 재현과 검증 55
3.3 생태계모델의 시뮬레이션 58
3.3.1 생태계모델의 입력자료 59
3.3.2 생태계모델의 안정성과 보정 63
3.3.3 적조발생의 재현 63

Ⅳ. 결과 및 고찰 66
4.1 현장관측 결과 66
4.2 해수유동장 재현의 결과 72
4.3 생태계모델링의 결과 77
4.4 Cochlodinum 적조의 발생의 기작 84

Ⅴ. 결 론 96

Reference 97

Appendix 106

List of Tables

Table 2.1. The compartments of an ecosystem model 24
Table 2.2. The definition of biological parameters used in an ecosystem model 51
Table 2.2. The definition of biological parameters used in an ecosystem model 52
Table 3.1. Input data for a hydrodynamic model 58
Table 3.2. Tidal level and degree at open boundary 58
Table 3.3. The estimation of discharge and pollutant loads 59
Table 3.4. Input data for an ecosystem model 60
Table 3.5. The pollutant loads from rivers flowing into the model region 61
Table 3.6. Input data of biological parameters used in an ecosystem model 66
Table 4.1. The dominant species of phytoplankton from July to Sep. in 2002 70
Table 4.2. The initial parameters in the ecosystem model for sensitivity analysis with phytoplankton growth and sensitivity coefficients 70
Table 4.3. The optimal growth condition *Cochlodinium polykrikoides* 89
Table 4.4. The C/N ratio of *Cochlodinium polykrikoides* 90
Table 4.5. Uptake of organic material by dinoflagellates 90
Table 4.6. Cell quota N,P of several dinoflagellates 91

List of Figures

Fig. 1.1. The location map of study area 6
Fig. 2.1. The schematic diagram of an eco-hydrodynamic model 9
Fig. 2.2. The cartesian coordinate for hydrodynamic mode 10
Fig. 2.3. The location of variables on the vertical grid of a three-dimensional 12
Fig. 2.4. The relative position of variables in the cell of model 13
Fig. 2.5. The flowchart of numerical calculation in a three-dimensional hydrodynamic model 20
Fig. 2.6. The schematic diagram for the cycle of nutrients(N and P) in the marine ecosystem 23
Fig. 2.7. Schematic diagram of nutrient supply, uptake, storage, mobilization, and assimilation by an hypothetical single-celled alga 25
Fig. 3.1 Station map of field observation for water sample collected 54
Fig. 3.2 Finite-difference grid of the three-dimensional model in the TongYeong Sea area 54
Fig. 3.3. Relationship among the chl.a, carbon and cell density of *Cochlodinium polykrikoides* 64
Fig. 4.1. Concentration of chl.a(㎍/L) during 29 Jul.~28 Aug., 2002 in Tongyeong Sea 68
Fig. 4.2. Diversity index(a) and evenness index(b) of phytoplankton at the sampling stations 71
Fig. 4.3. The amount of precipitation during 1 Jul.,~30 Aug., 2002 72
Fig. 4.4. Observed ammonia(a) and phosphate(b) concentration each level(1,2,3) during 29 Jul.~28 Aug., 2002, in Tongyeong Sea 73
Fig. 4.5. Comparison between calculated and observed Tidal height 74
Fig. 4.6. Correlation between calculated and observed Tidal height 74

Fig. 4.7. Comparison between calculated/observed temperature and salinity 75
Fig. 4.8. Tidal circulation around marine ranching area surface maximum current d uring the flood tide(a) and ebb tide(b) 78
Fig. 4.9 Comparison (line: calculated dot: observed) 80
Fig. 4.10. Distribution calculated surface chl.a for time dependent 82
Fig 4.11. Variation of Secchi depth in Tongyeong sea 86
Fig. 4.12. Concentration of Chl.a and tidal current at the time of blooming start, in 5 Aug., 2002 86
Fig. 4.13. The distribution of contributed physical process to Chlorophyll a at surface level according to time-dependent 88
Fig. 4.14. Distribution calculated surface Chl. a when condition I 93
Fig. 4.15. Distribution calculated surface Chl. a when condition II 94
Fig. 4.16 Calculated surface Chl. a each condition 95
Fig. 4.17. Annual variation of EI and N/P value in Tong-yeong area, 1986-2002 97
Fig. 4.18. Annual variation of GP and EI value in Tong-yeong area, 1986-2002 97

Ecological modelling for Harmful Algal Bloom formation in the Southern Coast of Korea

S. Jin Hong

Department of Environmental Engineering, Graduate school,
Pukyung National University

Abstract

A dinoflagellate, *Cochlodinium polykrkoides*, one of the harmful fish killing species, bloom caused mass mortalities of wild and farmed fish and shellfish with an alleged economic loss.

The aim of this study was to elucidate the mechanism of red tide outbreak. Bring to light the causality which related between 'source' and 'response', of nutrients in the red tide ecosystem by field survey and numerical simulation, and it could be of application to water quality management for prevents the events. Thus, it is very important that explain for quantitative causality of material cycle, and must be premised mechanism of red tide outbreak, to be undamaged form *Cochlodinium* red tide.

The numerical modelling study was achieved to combine all the information of axenic cultures(Physiological investigation by laboratory study), environmental condition (by field survey) and other necessary data for predictions of red tide occurrence.

The numerical model incorprated luxury consumption of nonlimiting nutrients and cell starvation process into a cell-quota based nutrients-phytoplankton scheme, and it suited better to nonsteady-state condition(time-dependent calculation). For

the growth limitation by nutrients, a cell quota (intracellular nutrient pool) model has been introduced after Lehman et al. (1975) and other researchers to distinguish it from the nutrient uptake kinetics. This allows phytoplankton to sustain growth through intracellular nutrient reserves without directly responding to variation in ambient nutrient concentration. In the model, the cell quota works as a limiting factor to the maximal growth rate of phytoplankton, and from among the two intracellular nutrients, the nitrogen quota SQN and the phosphorous quota SQP, the most limiting nutrient is determined based on Liebig's law of minimum as:

$$\mu_1 = \min\left\{\frac{SQN}{SQN+[N{:}C]\cdot P}\ \frac{\cdot SQP}{SQP+[P{:}C]\cdot P}\right\}$$

where, $[N{:}C]$ and $[P{:}C]$ represent the ratio of subsistent nitrogen and phosphorous quota versus carbon, respectively. Ambient nutrient, on the other hand, is considered as a limiting factor in the nutrient uptake process. The model assumes that the nutrient concentration reduces the maximal uptake rates of phytoplankton for phosphate, ammonium and nitrate according to the classical Monod nutrient kinetics.

The results of ecological modelling in Tongyeong sea is that, the HAB(by *Cochlodinium Polycrikoides)* is not internal but from the outside. Physical process play a important role in outbreak of *Cochlodinium* red tide in Tongyeong sea.

Cochlodinium Polycrikoides bloomed at the 'Nutrients poor sea' in the model just like real ecosystem, with rapid growth. Nevertheless, open ocean characteristics of Tongyoeng sea that has diffusive rather than accumulative have been eutrophied, and raised growth potential of phytoplankton, and the it must be controled.

Ⅰ. 서론

연안환경에 대한 과중하고도 끊임없는 스트레스는, 도시화 산업화로 대변되는 자연환경을 이용하려는 인간 활동의 증가 때문이라고 요약할 수 있다(Arhonditsisi et al., 2003). 연안역의 부영양화는 최근에야 주목하게 된 문제로(Nixon, 1995), 태초의 무구한 바다, 빈영양의 하구 또는 연안의 바다가 불과 수십 년만에 부영양화나 과영양상태로 진행되고, 그러한 환경에서 오는 식물플랑크톤이나 해조류의 증가, 유독성·유해성의 조류 bloom, 저층의 빈산소 또는 무산소화로 인한 저서생물의 폐사 등의 여러 가지 문제점을 드러내고 있기 때문에, 이를 개선하기 위한 노력에 고심하고있다(Arheimer, 2003; Ryding and Rast, 1989). 부영양화란(Eutrophication) 그리스어의 어원에서 온 것으로 '영양이 충분하다'는 의미의(well-fed) 'eu'와 '기르다'라는 의미의 'tropein'이 합쳐진 말로써(Marie, 2001), 수체에 질소와 인과 같은 식물의 영양물질과 유기물질의 증가를 의미하지만(Rast and Thornton, 1996), 지구적인 시간으로 일어나는 자연적인 부영양화가 아닌 인위적인 오염현상에 의해 수계시스템의 기능이 비정상적으로 되는 것을 의미하며(OECD, 1982; Edmondson, 1969), 높은 질소와 인의 부하에 관한 문제에 관심이 집중되고 있다(Graneli et al., 1990; Hansson et al., 1990).

영양염류가 외부로부터 공급되어 농도가 증가함에 따라 조류의 생산성이 높아지고, 이로 인하여 생태계의 구성과 대사가 양적, 질적인 면에서 급격한 변동을 가져오게 되는데, 이 영양염의 증가로 인한 문제(eutrophication) 중에서도, HABs(Harmful Algal Blooms)의 발생과 관련하여 관심이 증가하고 있다(Shumway, 1990; Smayda, 1990; Hallagraeff, 1993; Burkholder, 1998).

적조 현상은 Phytoplankton blooms, micro-algal blooms, 혹은 red tides, brown tides로 불리며, 유해적조(HABs, Harmful Algal Blooms)의 사전적 의미(by Encyclopedia Britannica)는 dinoflagellates가 대량 번식하여 해수의 색깔을 변색시키고 어패류를 폐사시키는 현상으로, 바다를 이용하고자 하는 인간에게는 관점에 따라 해양생물에 대한 먹이 공급(Feeding)의 과정으로도, 자연발생적인 재해의 하나로도, 혹은 인위적인 오염에 대하여 자연의 위대한 정화작용으로도 해석 할 수 있는데, 통용의 개념은 규조류 혹은 라피도조류, 편모조류 등을 포함하는 모든 조류의 이상증식

에 의한 물의 착색현상으로, 1차 생산자인 조류의 대발생 뿐만 아니라, 조류의 특정 종에 의한 장소의 독점상태를 말한다(Watanabe, 1986). 유해적조의 악영향은 인간의 연안역의 사용 용도 중에서도 취락이나 유흥을 위한 가치의 하락, 인간의 건강에 대한 위협(DSP, ASP, PSP등의 독성), 수산업의 피해 및 해양 생태계의 파괴 등으로 구분할 수 있다(Zingone, 2000). 요약하면, 특히 인간의 건강, 양식수산산업과 생태계의 파괴로 정리할 수 있다.

유해적조가 발생하는 기간에 수백만의 어류와 조류(鳥類), 고래와 여러 해양생물을 폐사 시킬 수 있는데(Forrester et al., 1977; Bossart et al., 1998), filter-feeding하는 물고기나 이매패류를 섭취한 바다 위를 나는 조류들의 대량폐사와(Shumway, 2003), 대형 포유류인 고래(특히, 수염고래의 일종인 *Eubalaena glacialis*)가 와편모조류의 신경독성의 매개체로 와편모조류를 섭이한 동물플랑크톤을 섭취하게 되고, 마비에 의해 익사하는 경우도 보고되고 있다(Durbin, 2002). 또한, 유해적조가 발생한 해역의 수상에서 여가나 스포츠 활동 중에 에어로졸 형태로 흡인된 독소에 의해 인체에 악영향을 받은 연구도 보고되고 있다(Backer et al., 2003).

지금까지의 관찰에 따르면, 3,400~4,100여종의 식물플랑크톤 중에서 약 300여종(7%)이 bloom을 일으키는 것으로 나타났고, 이 중에서 60~80%정도가 bloom을 일으킬 때 다른 생물에 대해 유해한 종으로 알려져 있으며, 또한 이 중에서 90%는 편모조류, 특히 와편모조류이다(Sounia 1995).

최근의 한국연안에서도 유해적조의 발생이 빈번하게 일어나고 있는데, 한국의 연안해역에서 적조를 일으키는 적조생물은 약 30여종으로 알려져 있다(Kim et al., 1993). 이 중에서도 3종은 수산생물을 직접적으로 죽일 수 있고, 6종은 패류의 독성을 유발한다. 어류 폐사 종은 와편모조류에 속하는 *Gymnodinium mikimotioi*(1981년 출현~), *Gyrodinium sp*(1992년 출현 ~, 세계최초), *Cochlodinium polykrikoides*(1982년 출현~)로, 특히 *Cochlodinium*종은 1995년에는 US$ 95.5 million 규모의 거액의 수산피해를 초래했을 뿐만 아니라 매년 대규모의 수산피해를 일으키고 있다(Kim, 1997; Kim, 1998). 한국 연안역의 *Cochlodinium polykrikoides*에 의한 유해적조발생시 방제활동의 수단으로 가장 널리 사용되는 것은 황토살포에 의한 방법으로, 유일하게 신뢰할 수 있

는 방법이라고 할 수 있다(Yun et al., 2003; Cho et al., 1999).

*Cochlodinium polykrikoides*는 1982년 낙동강하구에서 최초로 발생하여, 1988년까지는 진해만과 그 부근해역에서 주로 발생하다가, 1989년 이후로는 부영양화가 심각한 진해만 일원에서는 거의 발생하지 않고, 통영, 거제, 남해, 여수 등의 남해안 일원에서 초기 발생하여, 1995년, 1998년, 1999년, 2001년에는 동해안과 서해안에서도 본 종에 의한 적조가 발생하였다(Kim et al., 2001). 국내에서도 수많은 학자들이 *Cochlodinium* red tide에 관련된 여러 가지 연구를 수행하였는데, 적조의 구제 및 방제(Kim et al., 1997; Kim et al., 2001; Yun et al., 2003; Cho et al., 1999), 독성과 생물의 폐사 기구(Kim, 1998; Kim et al., 2002; Kim et al., 2001 ; Kim et al., 2000, Kim et al., 1999, Kang et al., 2003), 생리 생태적 연구(Kim et al., 2001a; Kim et al., 2002; Seo et al., 1998; Cho et al., 2001) 및 발생의 메카니즘(Lim et al., 2002; Lee et al., 2001; Kim et al., 2001; Kim et al., 1999; Yang et al., 2000; Jeong et al., 2000a; Jeong et al., 2000b)등이다. 특히, *Cochlodinium* 적조로 인한 수산업 피해를 줄이기 위해서는 *Cochlodinium* 적조 형성의 메카니즘의 명확한 설명이 전제되어야 하므로 현재의 연구도 수많은 과학자들의 노력에 의해 방제와 피해 영향의 관점에서 최초발생과 진행의 기작으로 관심이 집중되고 있는 실정이다.

국내의 연구를 살펴보면, Bloom이라는 현상은 전 지구적인 규모에서 일어나는 분자계와 세포계의 범위의 시공간의 수준을 가지는, 물리-화학-생물학적인 복잡한 과정인데도 불구하고, 다양한 정보들을 종합하려는 연구는 아직 이루어지지 않고 있다.

적조의 연구에 있어서는 여러 가지 방법이 있지만, 그 중에서도 가장 최선의 방법은 모든 종류의 정보를 종합하고, 현장의 자료를 통해 예측이 가능하도록 하는 수치 simulation 방법이 적조의 발생에 관한 연구(Yanagi et al., 1995)와 유해적조와 연안관리에 관해서 폭넓게 적용되고 있다(Walsh et al., 2002; Kunianao et al., 2001; Arhonditsis, 2000). Kamykowski(1981)는 유동장내의 생물집적을 model에서 재현한 것을 필두로, Kishi(1985, 1986)는 현장의 자료를 이용하여, 이류-확산 특히, 바람에 의한 집적을 simulation 하였고, 생물의 특성인 연직 일주운동에 의한 영양염 섭취를 고

려하기도 하였다. Yanagi(1995)는 *Gymnodinium*의 생물특성을 고려하고, 물리적인 이류, 확산에 의한 집적을 고려하여, 일본의 Suo-Nada and Iyo-Nada에서의 적조 발생 기작을 설명하였다. Townsend(2001)는 *Alexandrium*의 생물특성을 고려하고, 이류확산에 의한 집적이 원양에서의 Bloom(Offshore blooms, 빈영양상태)을 잘 재현하여, 발생의 메카니즘을 구명하였다.

국내의 생태계 모델의 적용은 수질관리를 위한 환경용량의 산정(최, 1993; 김, 1996; 이, 2001; 박, 2002)과 부영양화제어 및 오염된 해역의 물질순환(김, 1994; 김, 1996; 김, 2003; 이, 2001)을 재현하는데 주로 이용되어 왔으며, 식물플랑크톤의 군집거동에 관해서는 이(2000)와 권(2002)의 연구가 있는데, 모델에서 *Cochlodinium polycrikoides*의 적조의 이동과 확산을 시뮬레이션하면서, 물리적 현상에 중점(해류 및 바람)을 두고 있다.

현재 재현된 생태계의 물질순환의 모델들은 고농도의 영양염을 바탕으로하기 때문에 'high concentration of Nutrients is growth inhibition, low concentration is growth limitation(Jang, 2000)'이라는 원칙에서 벗어나기가 쉽고, 급작스러운 증식을 설명하기는 어렵기 때문에(Anderson et al., 1997; Roelke 2000) 유해적조 발생의 재현에 적합하지 않다고 생각된다. 따라서, 유해적조의 발생을 설명하기 위해서는 *Cochlodinium polycrikoides*의 성장의 특성, 즉 생물의 특성을 고려할 수 있는 특별한 schemes이 요구된다. 특히, Monod식이 나오기 오래 전부터 생물학자들은 영양물질이 세포물질로 전환되는 데에는 영양물질의 흡수나 성장을 합한 일단계 이상의 과정이 관여하며, 세포내에서 세포성장에 포함되어지지 않는 생화학 과정은 거의 없다는 것을 알고있었다(박등, 1999). 이러한 개념을 바탕으로 Caperon(1968)과 Droop(1968)은 세포의 성장이 외부의 물질농도보다 세포내부의 영양물질의 농도에 의한다는 사실을 인식하여 모델을 구성한 이래로, 최근까지 Rouzic & Bertru(1997)는 영양염 첨가 실험을 이용하여, 내부의 영양염 pool의 역할로써 식물플랑크톤의 급작스러운 성장을 설명하였으며, Roelke등(1999)은 이의 수식화를 통해 군집특성에 관한 해석을 수치모델로 설명하였다. 또한, Watanabe(1982)등도 세포내의 영양염 변동과 군집의 변동을 비교·설명하였으며, Yamaguchi(2001, 1999, 1997)는 세포내의 영양염을 종별로 비교하여 bloom의 특성을 연구한 바가 있다.

따라서, 본 연구에서는 한국 남해안에서 빈발하고 있는 유해적조의 발생 기구를 밝히기 위하여, 적조발생시기의 전후에 현장관측을 실시하고, 이 관측값을 토대로 수치 modeling을 실시하여 적조의 발생을 재현하고, 이들 입력값의 상호관계의 분석을 통해 수질관리에 적용할 수 있는 요인을 분석하기 위해서 식물플랑크톤의 성장식을 세포내의 영양염 변동과 환경중의 영양염 변동을 모델내에서 고려하여 급작스런 bloom의 발생을 설명하고자 한다.

연구 대상해역으로 선정한, 통영-사량도 해역은 남해안 중앙에 위치하고 있는데, 북쪽에는 고성만-자란만과 삼천포 수도로 구성되며, 동쪽으로는 통영-미륵도, 서쪽으로는 남해도-창선도, 중앙에는 사량상도, 남쪽으로는 욕지도를 중앙으로 외양으로 열린 해역이다. Fig.1에 나타낸 바와 같이 연안선이 매우 복잡하고, 해안선 부근에는 작은 섬들이 밀집해 있다. 수심은 외양을 향해 완만하게 깊어지며, 대부분이 20m이내의 얕은 해역이지만 욕지도를 벗어나서 10마일 부근에는 60m 이상으로 급격히 깊어지는 양상을 보이고 있다. 10년 평균 기온은 14℃, 월평균 최대, 최소 기온이 각각 25.8℃, 1.8℃이며, 연평균 강우량은 1,197mm이고, 연평균 강우일수는 83이다(KMA 1987 - 1996). 전체 강우량의 61%(733mm) 가 6월부터 9월 사이에 집중이 되고, 겨울철에는 강우 혹은 강설량이 많지 않다(8.2%, 99mm). 월 평균 수온은 지난 35년간의 자료에 의하면, 2월에 12.2℃로 가장 낮고, 8월에 24.2℃로 가장 높다(NFRDI, 1961 - 1995). 인근에는 7개의 상업항과, 13개의 어항이 존재하며, 항행 선박은 93%가 어선이다 (Tongyeong city, 2002). 또한 통영-사량도 해역 내에는 2,338건의 31,372ha의 어장이 조업 중인데(NMPA, 2001), 이중에서 75%가 기르는 어업이다. 또한, 미국 FDA로부터 지정된 4개의 패류생산 지정해역(Signated area No. 1, 2, 3, 6)이 21,890 ha가 (NFRDI, 2002) 있으며, 고성, 자란만과 북신만 인근해역에 수하식 굴양식장이 밀집되어있다. 통영해역에서는 적조를 일으키는 원인 생물은 1990년 이래로 12종의 편모조류와 7종의 규조류로 알려져 있다(MOMAF, 1998). Bloom을 일으키는 종은 유해성이 없는 종(non-toxic Bloom)에 의한 것으로부터 점차로 유해한 종에 의한(toxic species) Bloom으로 옮겨가고 있는데, 1992년 8월에는 잘 알려지지 않았던 어류패사성의 와편모조류인 *Gyrodinium sp.*에 의한 적조가 발생하였는데, 통영과 한국 남해안의 인근연

안해역에서, 약 2주 동안 Bloom이 지속되면서 양식산업에 큰 타격을 주었으며(Kim, 1995), 최근에는 와편모조류에 의한 bloom이 빈번하게 발생하고 있는데, 1993년 이래로 *Cochlodinium polykrikoides*의 유해적조가 해를 거르지 않고 매년 발생하여, 지역의 기간 산업인 수산양식업에 막대한 피해를 입히고 있다(Kim et al., 2001).

Cochlodinium polykrikoides bloom으로 인한 피해는 양식 시설의 증가와 함께 더욱 확대되고 있기 때문에 유해 적조에 대한 지속적인 감시 및 예찰은 물론, 양식피해를 줄이기 위해서는 국가적 차원에서 방제 정책의 입법과 함께 인위적인 부영양화로부터 연안역의 생태계를 보호하기 위한 여러 가지 활동의 필요성이 증가되고 있다(Kim, 1997).

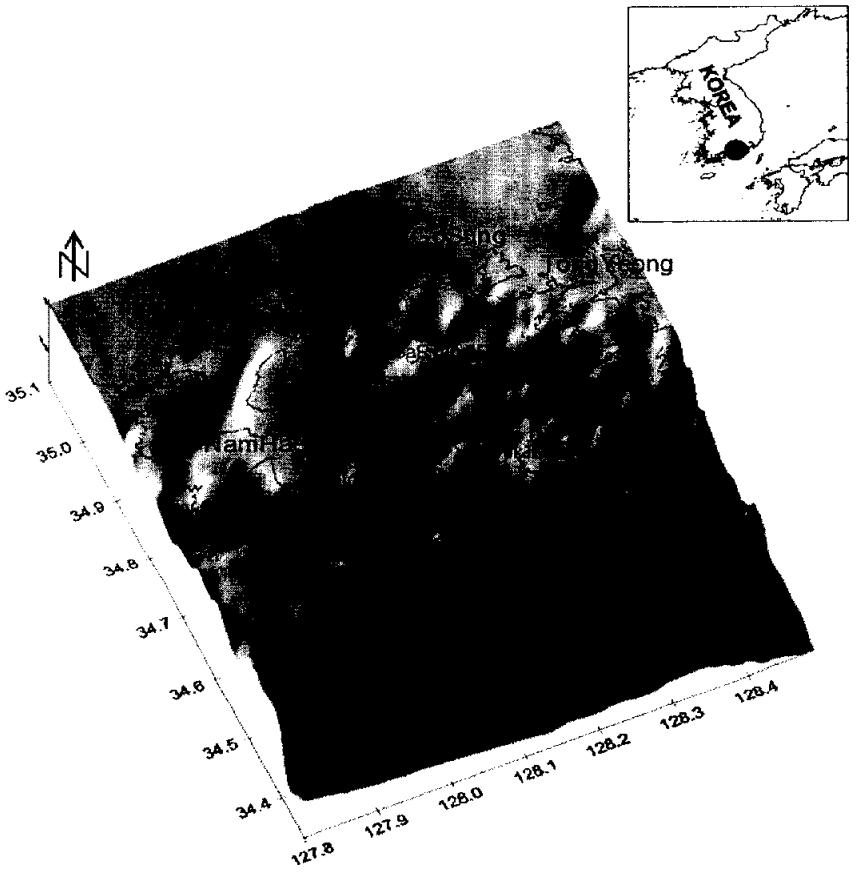


Fig. 1. The location map of study area.

Ⅱ. 이론적 배경

2.1 생태 유체역학 모델

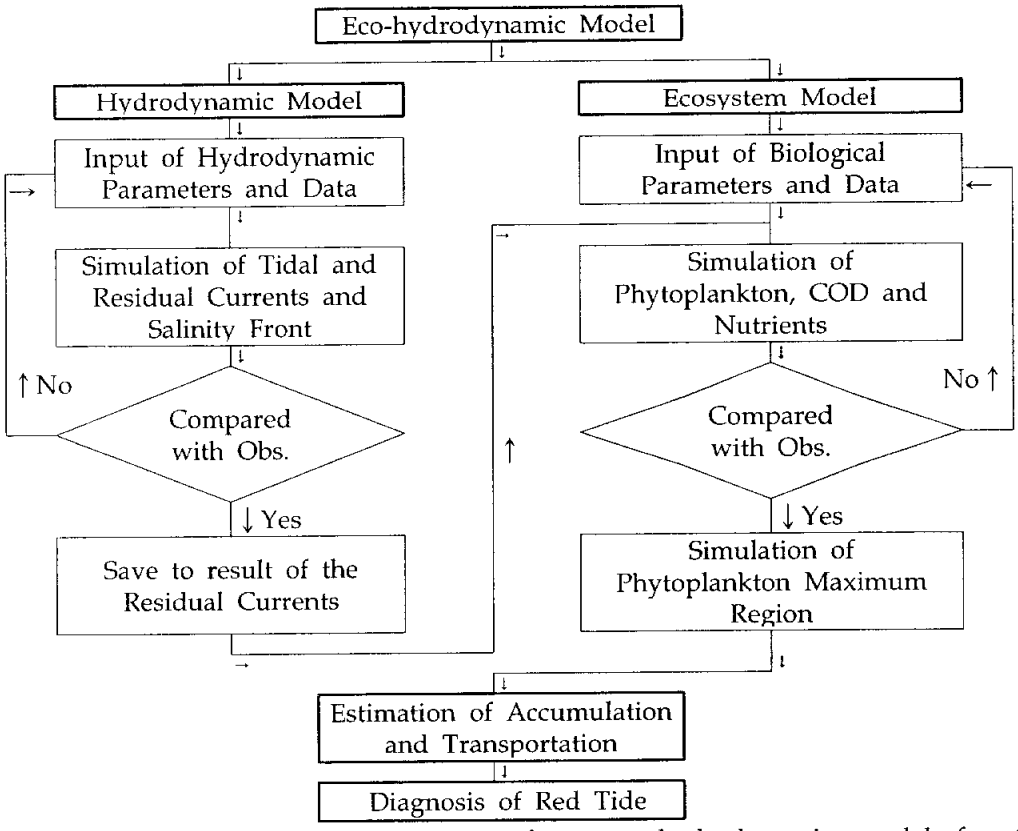


Fig. 2.1. The schematic diagram of an eco-hydrodynamic model for the flow of simulation.

생태-유체역학 모델(Eco-hydrodynamic model)은 해수유동 시뮬레이션을 위한 층계모델(Multi-level model: COSMOS, AIST, 1995)과 수질 시뮬레이션을 위한 생태계모델(Ecosystem model: EUTROP, AIST, 1994)로 구성되어 있다. Fig. 2.1과 같이 해수유동모델을 이용하여 조석류와 잔차류를 시뮬레이션하고 잔차류성분을 생태계모델의 유동장으로 입력하여 수질을 예측할 수 있다.

2.2 해수유동모델

2.2.1 해수유동모델의 개요

이 모델은 조석이 침입하는 내만에서 밀도류계의 3차원 해석을 행할 수 있고 생태계모델을 위한 유동장으로도 이용할 수 있다(Nakata et al., 1985).

연안해역은 海流, 潮流, 暖水塊에 의한 부력, 하천수 유입에 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 유동이 매우 복잡하다(柳, 1989b).

해양의 유동현상은 시간·공간적 규모에 따라서 여러 과정으로 구분되는데, 이에 따라서 예측 및 해석 방법에 차이가 있다. 일반적으로 하구에서는 조석과 담수의 유입, 해상풍, 해면을 통한 열교환 또는 외양수의 유입 등 여러 요인이 상호작용하여 해수의 유동에 영향을 미치고, 시간·공간적으로 끊임없이 변동하는 복잡한 亂流場이 형성되고 있다.

해양의 유동과정에 대해서는 확립된 유체역학의 이론이 있고, 흐름의 운동을 기술하는 미분방정식을 수치적으로 해석하여 예측하고 있다. 따라서 복잡한 해수의 유동을 정확히 예측하기 위해서는 조석이나 바람에 기인하는 해수면 변화(외부요인)와 담수유입 등 영향으로 생기는 해수의 밀도변화(내부요인)의 영향을 효과적으로 고려하기 위해 3차원적으로 취급할 필요가 있다.

2.2.2 해수유동모델의 전제조건

본 모델은 내만 및 하구에서 유체의 운동을 정식화한 운동방정식, 연속방정식, 조위의 변화를 정식화한 방정식, 염소량 확산방정식, 열(수온)의 확산방정식 및 해수의 밀도와 염소량, 수온과의 관계를 정식화한 상태방정식으로 구성된다. 모델을 정식화하기 위한 좌표계는 Fig. 2.2와 같이 평균 해면상에 x-y를, 연직상향에 z축을 가지고 있다. 기본방정식을 표현하기 위한 기본적인 제한조건은 다음과 같다

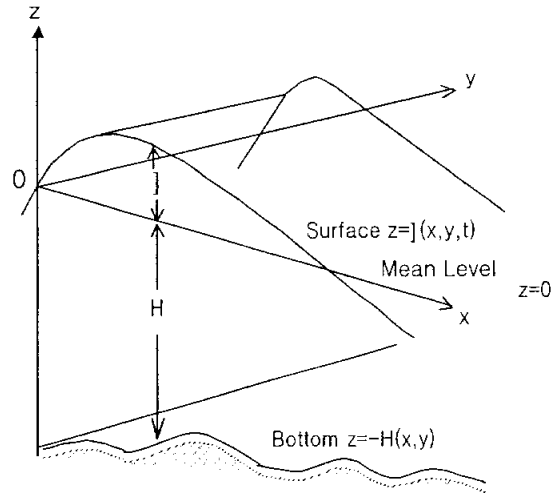


Fig. 2.2. The cartesian coordinate for a three-dimensional hydrodynamic model (MITI, 1991).

(1) 유체의 흐름을 구동하는 요인은 潮汐, 密度傾斜, 연안에서의 하천수의 유입 및 해상으로 부는 바람의 應力이다.

(2) 유체는 회전지구 상의 점성 비압축성 유체로 취급한다.

(3) 지구의 회전효과를 나타내는 코리올리 인자는 계산영역 전체에서 일정하다(f-평면근사).

(4) 연직방향으로는 정역학 평형을 가정하고, 운동은 무시한다. 즉, 중력가속도와 압력경사가 靜的으로 균형을 가진다고 본다.

(5) 해면상의 열 flux는 흡수일사량, 장파반사량, 해면상의 顯熱運送量 및 潛熱運送量의 수지로서 수식화한다.

(6) 밀도의 수온 및 염소량에 대한 관계식(상태방정식)은 Knudsen의 식을 이용한다.

(7) 연직방향의 층 구분과 변수의 위치는 Fig. 2.3과 같고 각 층내에서 평균화된 諸狀態量(유속, 온도, 염소량 등)을 예측 계산한다.

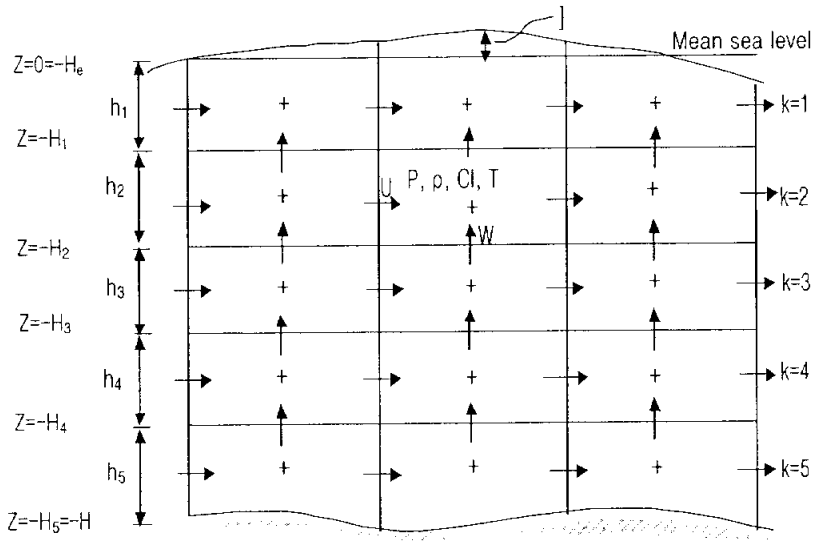


Fig. 2.3. The location of variables on the vertical grid of a three-dimensional hydrodynamic model(MITI, 1991).

2.2.3 해수유동모델의 기본방정식

유체의 운동에 대한 기본방정식은 운동방정식, 연속방정식, 자유표면방정식, 염소량 수지식, 열 수지식 및 해수의 밀도를 염소량과 수온과의 관계로 표현한 상태방정식으로 구성된다.

1) x-방향의 운동방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(u^2) - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) + f_o v$$
$$- g\frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{g}{\rho}\int_x^0 \frac{\partial \rho}{\partial x}\,dz' - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p_a}{\partial x}$$
$$+ \frac{\partial}{\partial x}\left(N_x \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(N_y \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(N_z \frac{\partial u}{\partial z}\right) \qquad (2.1)$$

2) y-방향의 운동방정식

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uv) - \frac{\partial}{\partial y}(v^2) - \frac{\partial}{\partial z}(vw) - f_o u$$
$$- g\frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{g}{\rho}\int_z^0 \frac{\partial \rho}{\partial y}\,dz' - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p_a}{\partial y}$$
$$+ \frac{\partial}{\partial x}(N_x \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(N_y \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(N_z \frac{\partial v}{\partial z}) \qquad (2.2)$$

3) 연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad (2.3)$$

4) 자유표면(조위)방정식

$$\partial\frac{\zeta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(\int_{-H}^{\xi} u dz) - \frac{\partial}{\partial y}(\int_{-H}^{\xi} v dz) \qquad (2.4)$$

5) 열수지 방정식(온도의 확산방정식)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uT) - \frac{\partial}{\partial y}(vT) - \frac{\partial}{\partial z}(wT)$$
$$+ \frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial T}{\partial z}) \qquad (2.5)$$

6) 염소량 수지방정식(염소량 확산방정식)

$$\frac{\partial Cl}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(u \cdot Cl) - \frac{\partial}{\partial y}(v \cdot Cl) - \frac{\partial}{\partial z}(w \cdot Cl)$$
$$+ \frac{\partial}{\partial x}(K_x \cdot \frac{\partial Cl}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \cdot \frac{\partial Cl}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \cdot \frac{\partial Cl}{\partial z}) \qquad (2.6)$$

7) 상태방정식

$$\rho = \rho\,(\mathrm{Cl}, \mathrm{T}) \qquad (2.7)$$

여기서는 Kundsen 식을 사용한다.

$$
\begin{cases}
\sigma = \dfrac{\sigma_t}{1000} + 1 \\
\sigma_t = \Sigma_t + (\sigma_0 + 0.1324)1 - A_t + B_t(\sigma_0 - 0.1324) \\
\sigma_0 = -0.069 + 1.4708Cl - 0.001570Cl^2 + 0.0000398Cl^3 \\
\Sigma_t = \dfrac{(T-3.98)^2}{503.570} \cdot \dfrac{T+28.30}{T+67.26} \\
A_t = T(4.7869 - 0.098185T + 0.0010843T^2) \times 10^{-3} \\
B_t = T(18.030 - 0.8164T + 0.01667T^2) \times 10^{-6}
\end{cases}
$$

여기서, u, v, w : X, Y, Z방향의 유속성분(㎝/sec)

ζ : 평균수면에서 자유표면까지의 높이(㎝)

H : 평균수면에서 해저까지의 깊이(㎝)

ρ : 유체밀도(g/㎤)

f_0 : 코리올리 인자(sec-1)

g : 중력가속도(㎝/sec2)

P_a : 대기압(g/㎝·sec2)

T : 수온(℃)

Cl : 염소량(‰)

N_x, N_y, N_z : x, y, z 방향의 渦動粘性係數(㎠/sec)

K_x, K_y, K_z : x, y, z 방향의 渦動擴散係數(㎠/sec)

k_x, k_y, k_z : x, y, z 방향의 熱擴散係數(㎠/sec)

2.2.4 층간 동역학

전항에서 나타낸 식 (2.1)~(2.7)의 기초방정식계를 Fig. 2.3에 나타낸 바와 같이 수심방향으로 층구분하여 복수의 층(level) 내측으로 연직 적분하여 각층내의 평균량에 관한 미분방정식계로 변형하면, 최종적인 수치모델의 기초식계가 된다. 이것의 도출방법은 생략하지만, 아래에 각 층(k=2, 3, …, K-1) 내의 각각의 상태량에 관한 식을 나타내었다(Nakata, 1983).

제 1층(표층) … 해면z= ζ부터 z-H_1까지

제 k층(level-k) …z=-H부터 z=H_k까지

제 K층(저층) … z=-H_{k-1}부터 해저 z=H_k까지

위와 같이 정한 각 level의 수평방향의 질량수송 M, N을 정의하고,

$$M_k = \int_{h_k} u dz, \quad N_k = \int_{h_k} v dz \tag{2.8}$$

x 및 y 방향의 운동방정식(2.1), (2.2)를 M_k와 N_k의 식으로 변환하면 다음과 같다.

x-방향의 운동방정식

$$\begin{aligned}\frac{\partial M_k}{\partial t} \cong & -\frac{\partial}{\partial x}(M_k u_k) - \frac{\partial}{\partial y}(M_k v_k) \\ & -(uw) \mid_{z=-H_{k-1}} + (uw) \mid_{z=-H_k} + f_o N_k \\ & + \frac{h_k}{\rho}\left\{ [\widetilde{P_x}]_k - \frac{1}{2} g h_k \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial x}\left(N_x \frac{\partial M_k}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}\left(N_y \frac{\partial M_k}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho} \gamma_x^{k-1,k} - \frac{1}{\rho} \gamma_x^{k,k+1}\end{aligned} \tag{2.9}$$

y-방향의 운동방정식

$$\begin{aligned}\frac{\partial N_k}{\partial t} \cong & -\frac{\partial}{\partial x}(N_k u_k) - \frac{\partial}{\partial y}(N_k v_k) \\ & -(vw) \mid_{z=-H_{k-1}} + (vw) \mid_{z=-H_k} + f_o N_k \\ & + \frac{h_k}{\rho}\left\{ [\widetilde{P_x}]_k - \frac{1}{2} g h_k \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial x}\left(N_x \frac{\partial N_k}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}\left(N_y \frac{\partial N_k}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho} \gamma_x^{k-1,k} - \frac{1}{\rho} \gamma_x^{k,k+1}\end{aligned} \tag{2.10}$$

연속방정식은 자유표면의 식과 같이 취급하여, 이하와 같은 방법으로 층간의 연직 속도성분 ω와 조류 ζ이 계산된다.

$$\text{즉,} \quad [P_x]_k = \int_{h_k} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz, \quad [\widetilde{P_x}]_k = \frac{\rho_k}{h_k} [\widetilde{P_x}]_k + \frac{1}{2} g h_k \frac{\partial \rho_k}{\partial x}$$

$$\begin{cases} w_k = 0 \\ w_{k-1} = w_k - \dfrac{\partial M_k}{\partial x} - \dfrac{\partial N_k}{\partial y} \quad (k = 2, 3, \cdots, K) \\ \dfrac{\partial \zeta}{\partial t} = w_1 - \dfrac{\partial M_1}{\partial x} - \dfrac{\partial N_1}{\partial y} \end{cases} \tag{2.11}$$

각 level의 연속의 식을 첨자 k에 대하여 풀면, 다음과 같은 자유표면 ζ에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$\partial\frac{\zeta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(\sum_k M_k) - \frac{\partial}{\partial y}(\sum_k N_k) \tag{2.12}$$

열수지식은 표층(k=1)을 별도로 취급하고, 표면 z=ζ(x, y, z)에서는 경계조건으로서 표면을 통하는 열 플럭스, Q를 식중에 고려해야한다.

표층(k=1)에서는,

$$\frac{\partial}{\partial t}(h_1 T_1) = -\frac{\partial}{\partial x}(M_1 T_1) - \frac{\partial}{\partial y}(N_1 T_1) + (wT)\mid_{z=-H_1}$$

$$+\frac{\partial}{\partial x}(h_1 k_x \frac{\partial T_1}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(h_1 k_y \frac{\partial T_1}{\partial y}) + \frac{Q}{C_v \rho} + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial T}{\partial z})\mid_{z=-H_1} \tag{2.13}$$

다른 level(k≠1)에서는,

$$\frac{\partial}{\partial t}(h_k T_k) = -\frac{\partial}{\partial x}(M_k T_k) - \frac{\partial}{\partial y}(N_k T_k) + (wT)\mid_{z=-H_{k-1}} - (wT)\mid_{z=-H_k}$$

$$+\frac{\partial}{\partial x}(h_k k_x \frac{\partial T_k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(h_k k_y \frac{\partial T_k}{\partial y})$$

$$+(k_z \frac{\partial T}{\partial z})\mid_{z=-H_{k-1}} - (k_z \frac{\partial T}{\partial z})\mid_{z=-H_k} \tag{2.14}$$

염소량 수지식에서는 표층으로부터 출입(flux)이 존재하기 때문에, 어느 level까지 같은 형태의 식으로 표현 할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(h_k Cl_k) = -\frac{\partial}{\partial x}(M_k Cl_k) - \frac{\partial}{\partial y}(N_k Cl_k)$$

$$-(wCl)\mid_{z=-H_{k-1}} + (wCl)\mid_{z=-H_k}$$

$$+\frac{\partial}{\partial x}(h_k K_x \frac{\partial Cl_k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(h_k K_y \frac{\partial Cl_k}{\partial y})$$

$$+(K_z \frac{\partial Cl}{\partial z})\mid_{z=-H_{k-1}} - (K_z \frac{\partial Cl}{\partial z})\mid_{z=-H_k} \tag{2.15}$$

이상의 식 (2.8)~(2.15)의 각 식이 multi-level model에서의 유동 simulation 계산의 기초식이 된다.

2.2.5 경계조건

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

1) **해안선상의 조건**(closed boundary condition)

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-slip조건, 즉, $(V_k)_n=0$, $\partial (V_k)t/\partial n=0$을 적용한다. 첨자 n과 t는 각각 해안선의 길이방향에 대한 법선, 접선방향의 성분을 나타낸다. 온도 T_k와 염소량 Cl_k에 대해서는 육지와의 교환을 고려하지 않는다.

$$k\frac{\partial T_k}{\partial n} = K\frac{\partial Cl_k}{\partial n} = 0 \tag{2.16}$$

2) **외양의 경계조건**(open boundary condition)

자유표면 ζ에는 침입하는 조석파의 파동을 正弦函數로서 나타내고, 유속성분 u_k, w_k, v_k에 대해서는 외부와의 운동량 교환이 자유롭게 행해지고 있는 자유 유출입의 조건(free-stream condition)으로 한다. 온도 T_k와 염소량 Cl_k에 대해서는 상류측 경계의 T_k, Cl_k를 고정하고(T^0_k와 Cl^0_k), 하류측 경계에서는 자유출입(free-stream)을 적용한다.

$$\zeta = \zeta_o + \sum_i A_i \cos(w_i\, t - \delta) \tag{2.17}$$

$$\frac{\partial M_k}{\partial n} = \frac{\partial N_k}{\partial n} = 0 \quad (k=1,\ 2,\ \cdots\cdots,\ k) \tag{2.18}$$

$$k\frac{\partial T_k}{\partial n} = K\frac{\partial Cl_k}{\partial n} = 0 \quad (\text{유출측 경계}) \tag{2.19}$$

$$T_k = T^o_k,\ Cl_k = Cl^o_k \quad (\text{유입측 경계})$$

3) **자유수면**(free surface)**상의 풍력에 의한응력**

모델의 기초식 (2.9)와 (2.10)의 k=1(표층)의 경우를 나타내는 항을 Bulk 형식을 이용해서 바람의 응력(wind stress)을 수식화하였다.

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho}\tau^s_x = \frac{\rho_a}{\rho}\cdot\gamma^2_a\, W_x\sqrt{W^2_x+W^2_y} \\ \frac{1}{\rho}\tau^s_y = \frac{\rho_a}{\rho}\cdot\gamma^2_a\, W_y\sqrt{W^2_x+W^2_y} \end{cases} \tag{2.20}$$

여기서, W_x, W_y : 풍속벡터의 x, y방향의 성분(m/s)

ρ_a : 공기밀도(g/㎤)

γ^2_a : 공기저항계수

4) 해저(bottom)상의 점성응력

상기의 3)에서와 마찬가지로 Bulk형식을 사용하여 해저마찰응력을 정식화하였다.

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho}\tau_x^b = r_b^2\, u_k\sqrt{u_k^2+v_k^2} \\ \frac{1}{\rho}\tau_y^b = r_b^2\, v_k\sqrt{u_k^2+v_k^2} \end{cases} \tag{2.21}$$

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

γ_b^2 : 해저마찰계수

5) 층간(inter-layer)의 점성응력

Bulk 형식을 사용하여 층간의 마찰응력을 수식화하였다.

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho}\tau_x^{k-1,\,k} = r_i^2(u_{k-1}-u_k)\sqrt{(u_{k-1}-u_k)^2+(v_{k-1}-v_k)^2} \\ \frac{1}{\rho}\tau_y^{k-1,\,k} = r_i^2(v_{k-1}-v_k)\sqrt{(u_{k-1}-u_k)^2+(v_{k-1}-v_k)^2} \end{cases} \tag{2.22}$$

여기서, γ_i^2 : 층간마찰계수

6) 해면과 대기간의 열 수지

열 수지식(온도의 확산방정식)의 각 level에서의 표식 (각각의 Bulk공식) 중 熱源을 식 중에 포함하는 것은 표층(k=1)에 있고, 그 외 level은 연직유속에 의한 이류와 연직방향의 와동확산에 의해서 열(온도)이 전달된다. 여기서는 표층에 있어서 열원의 항 $Q/C_v\rho$를 계산한다.

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

열 수지 요소 중에서 해면으로 흡수된 단파방사는 해면의 물리적 조건과는 무관하게 위도, 계절, 일시 및 운량에 의해서 결정되는 것이다. 해면으로부터 장파역방사는 수온에 의해서 결정되는 독립항이다. 그러나 그 외의 요소는 수온, 접수대기의 기온, 습도, 풍속 및 운량 등에 의해서 지배된다.

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

$$Q = Q_s - (Q_b + Q_c + Q_e) \tag{2.23}$$

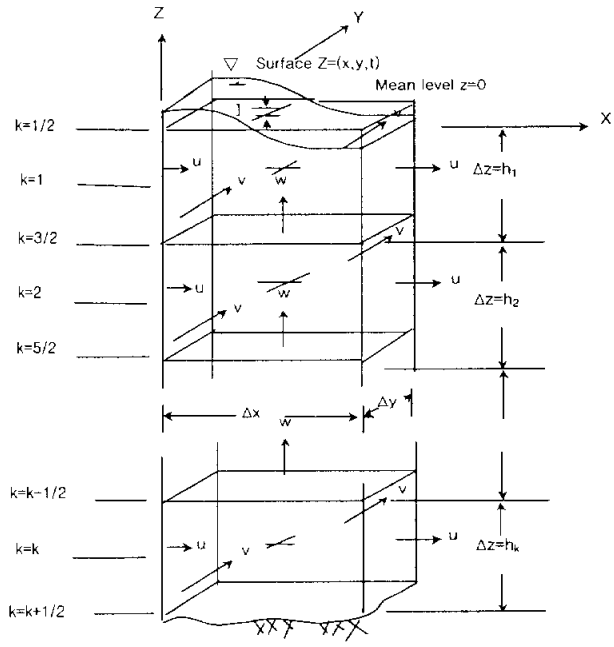


Fig. 2.4. The relative position of variables in the cell of model(MITI, 1991).

2.2.6 수치계산

다층모델의 기본식은 유한차분근사에 의해서 수치계산이 수행된다. 그리고 계산영역을 x, y, z방향 각각에서 I, J, K 본의 격자선을 사용해서 직방체의 mesh(cell)로 분할한다. x=i, y=j, z=k의 격자좌표에 의해서 식별되는 직방체의 각변의 길이를 각각 △xi, △yi, △zi로 한다(Variable mesh). 또 이 격자좌표계에 있어서 상태량의 배치는 Fig. 2.4에 표현한 방식으로 한다.

유속성분 u, v, w는 cell의 면상에, 온도(T), 염소량(Cl), 밀도(ρ) 및 압력(P)은 cell의 center에 각각 배치해 둔다(spatial staggered scheme). 또한 parameter Nx, Ny, Nz, Kx, Ky, Kz 등에 대해서는 대응하는 상태량과 정의점을 동일하게 한다. 수치계산 순서도는 Fig. 2.5에 나타내었다.

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

1) **대류조절**(Convective Overturning)

수치계산의 도중에 밀도의 연직경도 $\partial\rho/\partial z$(연직안정도)는 정확한 값을 가지나 운동량을 가지는 모든 연직교환의 항의 평가에 이상을 주고 계산을 불안정하게 한다. 이런 경우에 대비하여 시뮬레이션에서는 시시각각 $\partial\rho/\partial z$의 부호를 감시하여 양(+)의 부호가 생기면 해당하는 수주(Water column)내의 밀도를 연직방향으로 단일화해서 완전혼합의 상태로 하는 조작 즉, Convective Overturning의 처리를 행하도록 하고 있다.

2) **이류항의 차분** scheme

이류항은 모두 upstream scheme을 이용해서 차분근사하고 있지만, 실제의 programming에서는 upstream과 기계적인 중앙차분 scheme의 병용방식을 채택하고 있다. 예를 들면, 온도 T에 관한 x-방향의 이류항 $-\partial(MT)/\partial x$의 차분형은 upstream scheme에서는 (i → i+1로 흐르고 있다고 한다)

$$-\frac{\partial(MT)}{\partial x}\Big|_i = \frac{1}{2\Delta x_i}\{M_{i+1}(T_i+T_{i+1})+|M_{i+1}|(T_i-T_{i+1}) - M_i(T_{i-1}+T_i)-|M_i|(T_{i-1}-T_i)\} \quad (2.24)$$

다음에 기계적인 중앙차분법에서는

$$-\frac{\partial(MT)}{\partial x}\Big|_i = \frac{1}{\Delta x_i}\{(\alpha_{i+1}T_{i+1}+\beta_{i+1}T_i)M_{i+1}-(\alpha_i T_i+\beta_i Ti-1)M_i\} \quad (2.25)$$

여기서, $\alpha_i = \frac{\Delta_{x_{i-1}}}{\Delta_{x_i}+\Delta_{x_i}}$, $\beta_i = 1-\alpha_i = \frac{\Delta_{x_i}}{\Delta_{x_{i-1}}+\Delta_{x_i}}$

여기서, 2개의 scheme을 연속적으로 결합한 parameter θ를 도입해서 θ = 0일 때 (2.25)식, θ = 1일 때 (2.24)식의 좌변이 채용되도록 한 scheme을 작성하면, 다음식과 같다.

$$
\begin{aligned}
-\frac{\partial(MT)}{\partial x} &= \text{R.H.S.}(2.25) + \theta\{\text{R.H.S.}(2.24) - \text{R.H.S.}(2.25)\} \\
&= -\frac{1}{\Delta x_i}\{(\alpha_{i+1}T_{i+1} + \beta_{i+1}T_i)M_{i+1} - (\alpha_i T_i + \beta_i T_{i-1})M_i\} \\
&\quad -\frac{\theta}{\Delta x_i}\{M_{i+1}(T_i + T_{i+1}) + |M_{i+1}|(T_i - T_{i+1}) - M_i(T_{i-1} + T_i) \\
&\quad -|M_i|(T_{i-1} - T_i) \\
&\quad -2(\alpha_{i+1}T_{i+1} + \beta_{i+1}T_i)M_{i+1} + 2(\alpha_i T_i + \beta_i T_{i-1})M_i\} \\
&= -\frac{1}{\Delta x_i}\{(\alpha_{i+1}T_{i+1} + \beta_{i+1}T_i)M_{i+1} - (\alpha_i T_i + \beta_i T_{i-1})M_i\} \\
&\quad -\frac{\theta}{2\Delta x_i}\{(\gamma_{i+1}M_{i+1} + |M_{i+1}|)(T_i - T_{i+1}) \\
&\quad -(\gamma_i M_i + |M_i|)(T_{i-1} - T_i)\}
\end{aligned}
$$

여기서 $\gamma_i = \dfrac{\Delta x_{i-1} - \Delta x_i}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}$ 로 치환된다.

여기서는 운동방정식, 열 수지식, 염소량 수지식 전체에 대해서 이류항에는 이와 같은 혼합 scheme($0 \leq \theta \leq 1$)을 사용하고 있다(中田, 1985).

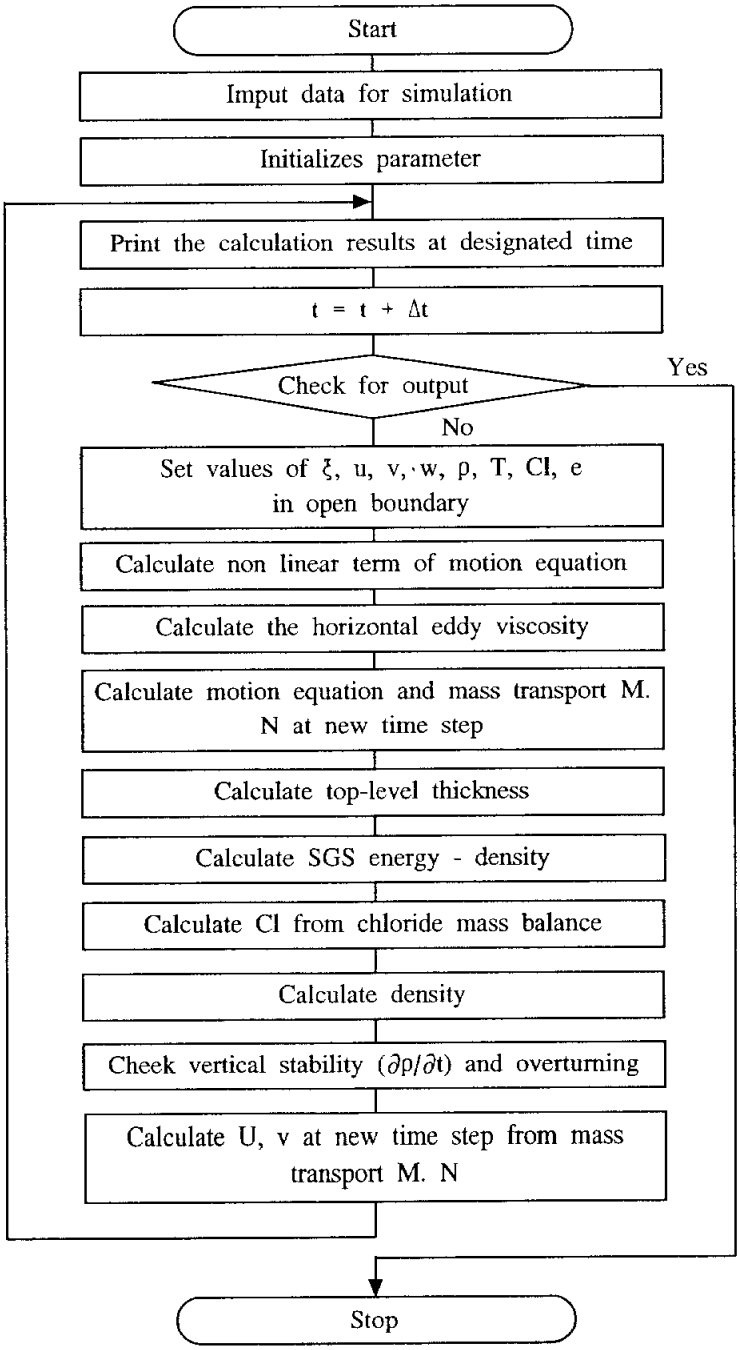


Fig. 2.5. The flowchart of numerical calculation in a three-dimensional hydro-dynamic model(MITI, 1991).

2.3. 생태계모델

2.3.1 생태계모델의 개요

생태계모델은 기존의 생태학 연구로부터 알고 있는 내용을 총괄하여 시스템 공학적인 방법으로 물질순환을 수치적으로 해석한 것이다. 모델은 생태계내 물질의 보존을 나타내는 미분방정식으로 구성되어 있지만, 순환경로의 하나 하나가 실험이나 관측사실로부터 유도된 경험에 따르고 있고, 메카니즘에 있어서도 유체역학모델과 같은 물리법칙에 근거한 모델과는 성격이 다르다. Fig. 2.6은 저차생산자만을 대상으로 한 연안 해양생태계내 물질순환으로서 탄소와 질소 및 인의 흐름을 나타낸 것이다. 생태계의 구성요소(Compartment, 상태변수)로서 4개의 유기요소, 4개의 무기요소 및 2개의 수질요소가 있는데, 유기구성요소에는 식물플랑크톤(P), 동물플랑크톤(Z), 현탁유기물(POM) 및 용존유기물(DOM)이 있고, 무기구성요소에는 인산인(PO_4^{3*}-P)과 암모니아질소(NH_4^+-N), 아질산질소(NO_2^--N), 질산질소(NO_3^--N)가 있으며, 수질의 구성요소로서 용존산소(DO)와 화학적 산소요구량(COD)이 정의되어 있다. 저생생물이나 퇴적물 등으로 이루어진 해저계도 환경인자로서 취급하여 모델의 변수로 구성되어 있다. Table 2.1에 생태계모델에 사용한 구성요소를 나타내었다.

Table 2.1. The compartments of an ecosystem model

	Compartment	Abbreviation	Unit
Organic material	Phytoplankton	P	mgC/m³
	Zooplankton	Z	mgC/m³
	Particulate Organic Material	POC	mgC/m³
	Dissolved Organic Material	DOC	mgC/m³
Inorganic material	Phosphate	PO_4^{3-}	μg-at/L
	Ammonia	NH_4^+	
	Nitrite	NO_2^-	μg-at/L
	Nitrate	NO_3^-	
Water quality	Dissolved Oxygen	DO	mg/L
	Chemical Oxygen Demand	COD	mg/L

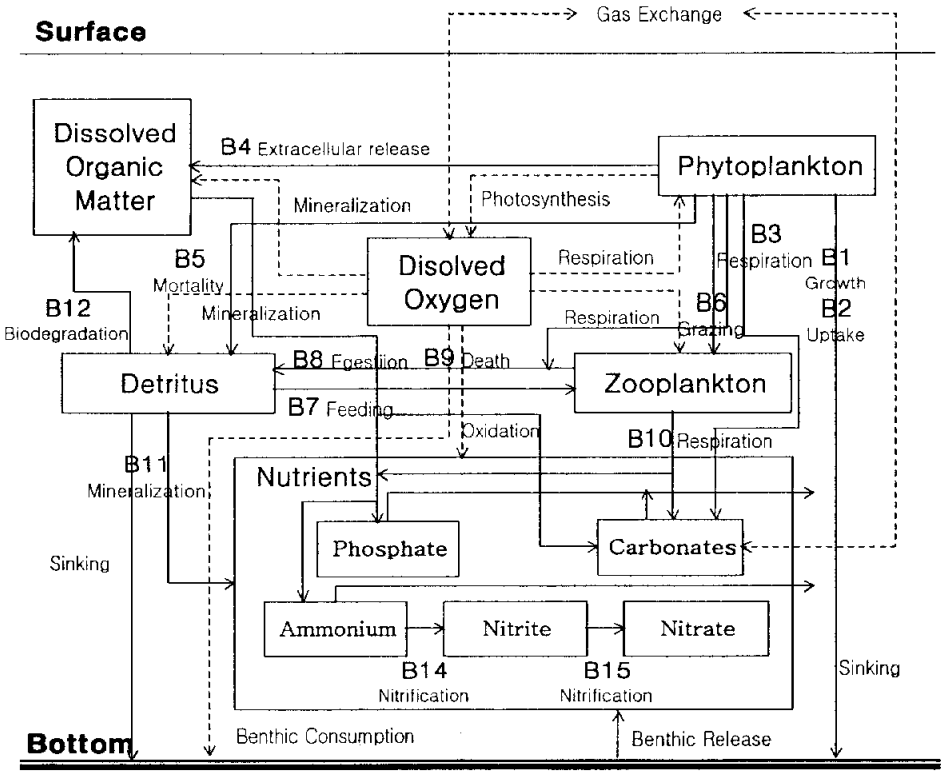


Fig. 2.6. The schematic diagram for the cycle of nutrients(N and P) in the marine ecosystem.

정식화의 기본적인 고려대상은 각 상태변수의 확산방정식에 의한 기술, 생물과정량에 의한 증가, 감소를 부하항에 의해 평가한다. 해역의 임의의 지점에 있어 구성요소의 현존량 B의 시간에 따른 농도변화를 기술한 방정식은 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \text{이류} + \text{확산} + \text{생물}\cdot\text{화학적 변화량}$$

$$= -u\frac{\partial B}{\partial x} - v\frac{\partial B}{\partial y} - w\frac{\partial B}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left[K_x\frac{\partial B}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[K_y\frac{\partial B}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K_z\frac{\partial B}{\partial z}\right] + \frac{dB}{\partial t} \qquad (2.26)$$

여기서, B = 구성요소의 현존량

t = 시간

u, v, w = x, y, z방향의 유속성분

K_x, K_y, K_z = x, y, z방향의 와동확산계수

$dB/\partial t$ = 모든 생물·화학적 과정에 의한 단위시간당 구성요소의 변화량

상기의 확산방정식에서 만내 흐름에 의한 물질수송(이류)이 계산되므로 생태계모델은 층계유동모델과 연결되어 있다. 유동모델의 시뮬레이션에서 계산된 유속성분 (u,v,w)을 생태계모델에 입력하여 각 구성요소의 현존량이 시간적, 공간적인 변화에 따라 예측된다.

2.3.2 생물과정의 수식화

1) 식물플랑크톤 구성요소(P)

식물플랑크톤의 구성요소로서 수역내의 우점종에 대한 평균적인 단일종 군집을 고려한다. 명백한 종의 遷移가 관찰된 수역에서는 복수의 그룹을 고찰하고 각각 다른 체내 영양소 조성이나 온도, 광, 영양염으로의 應答樣式을 고찰하는 것이 필요하지만, 종간 경쟁의 문제에 대한 생물변수를 선택할 때에 불확실한 요인이 많기 때문에 가능한한 간단하게 모델화하였다. 식물플랑크톤 생물량, P(㎎C/㎥)의 시간에 따른 농도변화는 다음과 같이 기술된다.

$$\frac{dP_i}{dt} = B_1 - B_3 - B_4 - B_5 - B_6 - B_7 - B_{21} \tag{2.27}$$

즉, 식물플랑크톤의 시간변동량은 {광합성에 의한 증식 - 세포외분비 - 호흡 - 동물플랑크톤에 의한 섭식 - 저서생물에 의한 섭식 - 고사 - 침강에 의한 제거}로 표현하였다.

여기서, $B_1 = v_1(T) \cdot \mu_1(P, SQP, SQN) \cdot \mu_2(I, P) \cdot P$: 광합성에 의한 증식

$B_3 = \mu_3(P) \cdot P$: 세포외 분비

$B_5 = v_3(T) \cdot P$: 호흡

$B_4 = \sum_{j=1}^{NZ} \mu_8(P, POC, SQN) \cdot v_4^j(P, POC) \cdot Z_j$:동물플랑크톤에 의한 섭식

$B_{21} = v_{11}(T) \cdot P$: Bentos에 의한 섭식

$B_6 = m \cdot P^2$: 고사

$B_7 = w_P \cdot \frac{\partial P}{\partial z}$: 침강

(1) **식물플랑크톤의 최대증식속도**

최대증식속도 v_1의 온도 의존성은 잘 알려져 있으며, Eppley(1972)는 온도에 대한 식물플랑크톤 성장속도의 응답을 조사하여 1일당 세포분열회수(day^{-1})로 나타낸 비성장속도 μ는 온도 T의 함수로서 다음과 같이 표현하였다.

$$\log \mu = 0.0275 \cdot T - 0.070 \quad (2.28)$$

$$\mu = 0.851 \cdot \exp(0.0633T)$$

일단 군집의 성장속도 v와 세포분열속도 μ와의 사이에는 $v = \mu \cdot \ln 2 = 0.693 \cdot \mu$의 관계가 있으므로 증식속도의 온도 의존성은 $v_1 = 2.1\exp(0.0633T)$로 표시된다.

이 식을 일반화해서 다음과 같이 수식화하였다.

$$v_1 = v_1(T) = a_1 \exp(\beta_1 \cdot T) \quad (2.29)$$

여기서, a_1 : 0℃에 있어서 최대성장속도(day^{-1})

β_1 : 온도계수($℃^{-1}$, $\beta_1 = \ln Q_{10}/10$)

(2) **광-광합성 응답**

광의 강도에 대한 식물플랑크톤의 광합성응답을 적당한 수식으로 근사하는 시험은 빈번히 이루어지고 있는데, 최대광합성속도로 규격화된 광합성속도 μ_2와 광강도 I와의 관계(광합성-광곡선)를 표시하는 가장 간단한 표현은 다음의 쌍곡선 식이다.

$$\mu_2 = \frac{I}{\alpha + I} \quad (2.30)$$

광강도의 증가에 따라 μ_2는 증가하고, 최대치 1에 근사한다. 强光조건하에서는 광저해 효과를 고려하여 Steele(1962)이나 Vollenweider(1965)는 다음과 같은 표현을 제안하였다.

$$\mu_2 = a \cdot I \exp(1 - a \cdot I) \quad (2.31)$$

여기서, a는 정수이다. I가 1/a와 같이될 때, μ_2는 최대로 되고 그 이상의 광에서는 감소가 된다. 이 의미에서 1/a를 광합성의 최적광량 Iopt로 볼 수 있다.

$$\mu_2 = \frac{I}{I_{opt}} \cdot \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right) \quad (2.32)$$

수중내 광강도는 탁도에 의해서 감쇄하며, 이것을 Lambert-Beer법칙에 따라 다음과 같이 표현하였다.

$$I(z) = I_o \exp(-k \cdot z) \tag{2.33}$$

여기서, I_z : 수심 Z에 있어서 광

I_o : 해면에서의 강광도 세기

k : 소산계수

전 수주를 통해서 μ_2의 평균치나 어떤 수심층 내에서의 평균적인 μ_2의 값을 얻기 위하여 수심방향으로 적분하는 조작이 필요하다. 적분에 의한 수심 Z_1에서 $Z_2(Z_1<Z_2)$에서의 평균치는 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{\mu_2} = \frac{1}{Z_2 - Z_1} \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{I_o}{I_{opt}} e^{-kz} \cdot \exp\left\{1 - \frac{I_o}{I_{opt}} e^{-kz}\right\} dz$$

$$= \frac{1}{k(Z_2 - Z_1)} \left[\exp\left\{1 - \frac{I_o}{I_{opt}} e^{-kz_2}\right\} - \exp\left\{1 - \frac{I_o}{I_{opt}} e^{-kz_1}\right\} \right] \tag{2.34}$$

광합성의 일변화는 해면의 광강도 I_o의 변화에 따르고 있다. 일반적으로 평면 입사 태양광의 일변화는 경험적으로 근사한 것이 알려져 있고, Ikushima(1967)는 맑은 날에 적용할 수 있는 것으로서 다음 식을 제안하였다.

$$I_o = I_o(t) = I_{max} \cdot \sin^3\left(\frac{\pi}{DL} \cdot t\right) \tag{2.35}$$

여기서, t : 시각

Imax : 태양고도가 최고가 될 때 해면입사광의 강도(최대일사량)

DL : 일출에서 일몰까지의 일장

또한, 본 모델에서는 식물플랑크톤에 의한 자기차광(self-shading)을 고려하여 광소산계수 k를 Chl. a 농도의 함수로서 다음과 같이 수식화하였다.

$$k : k(P) = k_0 + K[\text{Chl. a} : C_p] \cdot P \tag{2.36}$$

여기서, k_0 : Chl. a에 의존하지 않는 광소산계수(m^{-1})

K : Chl. a농도의 비례계수($m^{-1} \cdot (mg\ Chl.\ a/m^3)^{-1}$)

Chl. a : C_p : 식물플랑크톤 체내의 Chl. a : C 比

P : 탄소량으로 표현된 식물플랑크톤 생물량($mg\ C/m^3$)

따라서, 광합성속도의 수식화는 다음과 같이 표현된다.

$$\mu_2(I,P) = \frac{I_0(t)}{I_{opt}} e^{-k(p)\cdot z} \cdot \exp\left(1 - \frac{I_0(t)}{I_{opt}} e^{-k(p)\cdot z}\right) \quad (2.37)$$

(3) **영양염에 의한 성장의 제한 및 세포내 영양소 축적량**(cell quota)

식물플랑크톤에 의한 영양염 섭취의 동태는 Michaelis-Menten에 의한 산소반응속도식으로 표현할 수 있다. 본 모델에서는 식물플랑크톤의 성장과 영양염 섭취를 동일한 과정으로 간주하여 환경 중의 영양염 농도에 의한 성장의 제한효과를 Michaelis-Menten식으로 표현하였다.

$$\frac{\mu}{\mu_{max}} = \frac{N}{K_s + N} \quad (2.38)$$

여기서, μ/μ_{max} : 최대성장속도로 규격화된 비성장속도

N : 영양염농도(μg-at/L)

K_s : 반포화정수(μ / μ_{max}=1/2일 때, 영양염농도)

복수의 영양염에 의한 제한효과를 나타내는 경우에는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\mu}{\mu_{max}} = \frac{N_1}{K_{s_1} + N_1} \cdot \frac{N_2}{K_{s_2} + N_2} \cdot \frac{N_3}{K_{s_3} + N_3} \cdots \quad (2.39)$$

이 수식화에는 생물학적인 의미가 고려되어 있지 않으므로 여기에 Liebig의 최소법칙을 적용하여 다음 식으로 나타내었다.

$$\frac{\mu}{\mu_{max}} = \min\left\{\frac{N_1}{K_{s_1} + N_1}, \frac{N_2}{K_{s_2} + N_2}, \frac{N_3}{K_{s_3} + N_3}, \cdots\right\} \quad (2.40)$$

특히, 2개의 영양염인 질소(N)와 인(P)을 고려한 경우는 다음과 같다.

$$\frac{\mu}{\mu_{max}} = \mu_1(DIN, DIP) = \min\left\{\frac{N}{K_{sn} + N}, \frac{P}{K_{sp} + P}\right\} \quad (2.41)$$

여기서, Ksn : 용존무기질소(NH_4^+ + NO_3^- + NO_2^-)의 반포화정수(μg-at/L)

Ksp : 인산인(PO_4^{3-}-P)의 반포화정수(μg-at/L)

그런데, 최근 영양염의 섭취속도와 식물플랑크톤의 성장속도와의 관계를 본질적으로 다른 방향으로 생각하는 model을 많은 연구에서 적용하고 있다. 이것은, 식물플랑크톤의 세포내 축적되는 영양염(cell quota nutrients)의 양으로부터 성장이 제한을 받는다는 것을(Droop, 1973) 모델내에서 고려하는 것이다. Droop에 의해 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$\mu = \mu_{max}(1-\frac{Q_0}{Q}) \quad (2.42)$$

여기서, μ_{max}: 최대광합성 속도

Q : cell quota

Q_0 : minimum cell quota

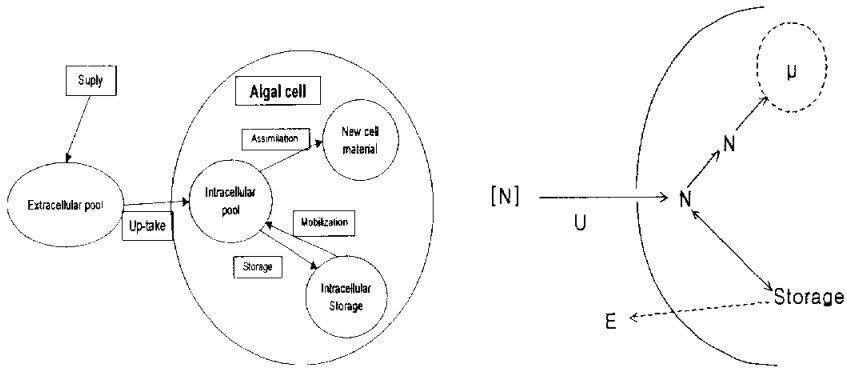


Fig. 2.7. Schematic diagram of nutrient supply, uptake, storage, mobilization, and assimilation by an hypothetical single-celled alga(a). The terms of the nutrients dynamics of an algal cell(b).

영양염이([N], in Fig. 2.7(b) by Graham, 1998) 섭취되어(U), 세포내로 유입되면, 대사(M)와 성장의 과정(μ)에서 사용되며, 체외 배출되는 부분(E)과 저장되는 부분이 있다. 식물플랑크톤의 세포는 크게 나누어 세포기질(세포조직)과 여타의 조직부분으로 나눌 수 있는데, 세포기질이외의 부분은 세포를 둘러싸고 있는 환경의 영양염 농도의 변동에 따라 변하는데, 세포기질 이외에 포함된 영양염 부분을 cell quota라고 부른다. 성장을 유지하는 최저한 필요한 cell quota, 즉 세포조직내의 영양염 pool을 minimum cell quota 혹은 subsistent quota라고 하는데, Q= Q_0 일 때 μ=0이므로, 이 값이 크면, 성장속도가 느려지는 것을 의미하며, 작으면 낮은 농도에서 증식할 수 있다는 것을 의미한다.

이 모델에서는 질소와 인의 2가지 종류의 영양염을 다루는데, cell quota는 질소에

대한 것(Q_N)과 인에 대한 것(Q_P)의 quota를 고려한다. 이 2종의 영양염에 의한 광합성의 제한에 관해서, 식 (2.41)을 변형하면,

$$\mu = \mu_{max} \cdot \min\left\{1 - \frac{QP_0}{QP}, 1 - \frac{QN_0}{QN}\right\} \tag{2.43}$$

여기서, QP_0, QN_0 : 細胞組織中의 P와 N

QP, QN : 細胞內의 P와 N 總量

세포조직중의 P와 N의 양은 원소구성비 $C:N:P$ 비에 기초로 하는데, 탄소량단위의 식물플랑크톤 생물량 P(㎎C/m^3)로 바꾸면 나타내기 위해서는,

$$QP_0 = [P_h : C_p] \cdot P, \quad QN_0 = [N : C_p] \cdot N \tag{2.44}$$

여기서, $[P_h : C_p], [N : C_p]$: 식물플랑크톤세포내의 전탄소량에 대한 세포조직내의 인 및 질소량의 비(C/P$_h$, C/N비의 역수)

이들간의 관계를 minimum cell quota, cell quota로써 인, 질소에 대해 각각 기호 SQP, SQN으로 나타내면,

$$QP = SQP + QP_0, \quad QN = SQN + QN_0 \tag{2.45}$$

식 (2.44)와 (2.45)의 관계를 (2.43)의 식에 대입하면,

$$\mu = \mu_{max} \cdot \min\left\{\frac{SQP}{SQP + [P : C_p] \cdot P}, \frac{SQN}{SQN + [N : C_p] \cdot P}\right\} \tag{2.46}$$

μ_{max}의 제한항을 기호 μ_1(P, SQP, SQN)으로 나타내면,

$$\mu_1(P, SQP, SQN) = \mu_{max} \cdot \min\left\{\frac{SQP}{SQP + [P : C_p] \cdot P}, \frac{SQN}{SQN + [N : C_p] \cdot P}\right\} \tag{2.47}$$

또한, N, P등의 식물플랑크톤의 그룹에 대하여, 세포내의 인 및 질소의 함유량의 변동을 시간변화형태로 나타내면,

인 保持量(SQP, cell quota P, mmolP/m^3)

$$\frac{dSQP}{dt} = B_2^P - [P : C_P] \cdot B_1 - (B_4 + B_{21} + B_6)\frac{SQP}{P} - w_P \cdot \frac{\partial}{(\partial z)}(SQP) \tag{2.48}$$

질소 保持量(SQN, cell quota N, mmolN/m^3)

$$\frac{dSQN}{dt} = B_2^N - [N : C_P] \cdot B_1 - (B_4 + B_{21} + B_6)\frac{SQP}{P} - w_P \cdot \frac{\partial}{(\partial z)}(SQN) \tag{2.49}$$

여기서, $B_2^P = \mu_4(PO_4) \cdot [P:C_P] \cdot P$, $B_2^N = \mu_5(NH_4, NO_3) \cdot [N:C_P] \cdot P$는 각각 인산염 섭취, 무기질소 섭취를 나타낸다. 그런데, 세포내의 영양염 축적량(cell quota)을 관찰하면, 배양액내의 영양염 농도에 따라 다르게 변동한다는 것을 알 수 있다. 木幡等(1982)은 batch culture에 의해 세포수가 변화하지 않는 상태에서 cell quota와 배양액중의 인농도와의 관계로서 평형상태에서의 cell quota는 다음 식으로 표현할 수 있다고 하였다.

$$PQ'_{\max} = PQ_{\max} \cdot \frac{N}{K_Q + N} \tag{2.42-1}$$

여기서, $PQ'_{\max}$: 영양염농도 N에서의 cell quota의 최대치

$PQ_{\max}$: 세포내의 cell quota의 최대치

K_Q : $PQ_{\max}/2$일때의 영양염농도

또, Lehman (1975)는 영양염섭취의 모델화에서, 외부의 영양염 농도 N에 의존하는 섭취속도 μ를 다음과 같이 표현하였다.

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{N}{K_s + N} \cdot \frac{Q_m - Q}{Q_m - K_Q} \tag{2.42-2}$$

여기서, $\mu_{\max}$: 최대섭취속도

K_s : 섭취에 관한 반포화정수

Q: cell quota

K_Q : minimum cell quota

Q_m : 최대의 가능한 영양염 保持量

본 모델에서는 cell quota를 1세포중의 영양염함유량이 아니라, 단위식물플랑크톤 생물량 전체의 함유량으로 정의하였지만, 섭취의 동태는 위 식을 이용한다. 이것을 이용하여 (2.48)식에서의 B_2^P내의 인산염의 섭취 속도를 정식화하면,

$$\mu_4(PO_4) = UP_{\max} \cdot \frac{PO_4}{K_P + PO_4} \cdot \mu_6(P, SQP)$$

$$\mu_6(P, SQP) = \left\{ PQP_{\max} - \frac{[P_h : C_p] \cdot P + SQP}{[P_h : C_p] \cdot P} \right\} / (PQP_{\max} - 1) \tag{2.48-1}$$

여기서, K_P : 인섭취에 관한 반포화상수

$PQP_{\max}$: 최대가능한 인 保持量의 minimum cell quota에 대한 비

$[P_h : C_p] \cdot P$: 인의 minimum cell quota

SQP : 인의 cell quota

질소에 관해서는 NH_4와 NO_3의 선택섭취를 고려하는데, 암모니아와 질산염 모두 풍부한 경우에는 대부분의 경우 식물플랑크톤은 암모니아를 선호하기 때문에, 질산염 섭취는 암모니아에 의한 억제의 효과가 있다는 것을 고려하여야 하는데, Wroblewski(1977)는 이 효과는 암모니아농도의 지수함수에 근사하도록 나타내었다.

$$e^{-\Psi} \cdot NH_4,\ \Psi = 1.462(\mu g - atNH_4/L)^{-1}$$

따라서, 암모니아, 질산염과의 섭취속도를 (2.42-2)식에 따라 나타내면,

$$\mu_5(NH_4, NO_3) = UN_{\max} \cdot \left\{ \frac{NH_4}{K_{NH_4} + NH_4} + \frac{NO_3}{K_{NO_3} + NO_3} e^{-\Psi \cdot NH_4} \right\} \cdot \mu_7(P, SQN)$$

$$\mu_7(P, SQN) = \left\{ PQN_{\max} - \frac{[N : C_p] \cdot P + SQN}{[N : C_p] \cdot P} \right\} / (PQN_{\max} - 1) \qquad (2.48\text{-}2)$$

여기서, K_{NH_4}, K_{NO_3} : 질소섭취에 관한 반포화상수

$PQN_{\max}$: 최대 가능한 질소 保持量의 minimum cell quota에 대한 비

$[N : C_p] \cdot P$: 질소의 minimum cell quota

SQN : 질소의 cell quota

(4) 세포외 분비

식물플랑크톤은 광합성에 의해 고정된 유기물질의 일부를 용존유기물의 형태로 세포외로 배출한다. 이 현상을 세포외 분비(extracellular release), 배설(excretion) 또는 침출(exudation) 등으로 부른다. Eppley and Sloan(1965)은 정상적인 세포에 있어서 일반적으로 세포분비량은 고정된 전 탄소량의 15%이하라고 하였다. 이 비율에 관해서는 Watt(1966)에 의한 상세한 연구가 있으며, 그는 실험에 의해 다음과 같은 Chlorophyll a농도에 대한 상관식을 얻었다.

$$\ln(\%\beta) = \ln 13.5 - 0.00201 \cdot Chl.a \qquad (2.50)$$

따라서 본 모델에서도 동일식을 채택하면 다음과 같다.

$$\mu_3(P) = \beta = 0.135 \cdot \exp\{-0.00201 \cdot [Chl.a : C_p] \cdot P\} \quad (2.51)$$

여기서, P : 탄소량으로 표현한 식물플랑크톤 생물량(㎎C/㎥)

$[Chl.a : C_p]$: $Chl.a/C$ 比

(5) **호흡**

광합성에 의해서 생산된 유기물은 호흡에 의해서 소비된다. 호흡은 체적이나 양보다도 세포의 표면적과 밀접한 관계가 있는 것으로 보인다. 그러나 호흡의 상세한 메카니즘은 분명하지 않기 때문에 Di Toro et al.(1971)과 같이 지수함수형의 온도 의존성으로 가정하였는데, 식물플랑크톤의 호흡속도 $v_2(day^{-1})$는 다음과 같이 표현된다.

$$v_2(T) = \alpha_2 \cdot \exp(\beta_2 \cdot T) \quad (2.52)$$

여기서, α_2 : 0℃에 있어서 호흡속도(day^{-1})

β_2 : 온도계수(℃-1 : lnQ10/10)

(6) **고사에 의한 소실**

식물플랑크톤이 세포외 분비 이외에 소실하는 생물량으로서 자연사망 즉, 고사에 의한 것을 고려해야 한다. 자연사망이란 세포의 노후화에 따른 사멸을 말하지만 이 자연사망의 양을 확인하는 것은 곤란하다.

이 자연사망에 의한 소실량이 식물플랑크톤 현존량에 비례한다면, 이 소실량은 $\alpha \cdot P$로 표현된다. α는 사망속도(day^{-1})로서 세포가 노후화해서 분해할 때까지의 시간의 역수이다.

본 모델에서 고사속도 α에 관해서는 앞에서 설명한 호흡속도와 같이 온도 의존성을 고려하여 다음과 같이 표현하고 있다.

$$\alpha = v_4(T) = \alpha_4 \cdot \exp(\beta_4 \cdot T) \quad (2.53)$$

여기서, α_4 = 0℃에 있어서 고사속도(day^{-1})

β_4 = 온도계수($℃^{-1}$)

(7) **침강에 의한 소실**

침강은 생물·화학적 과정이라기 보다는 물리적 과정의 하나로 보는 것이 타당하지만 편의상 생물·화학적 과정의 수식화 중에 포함시켰다. 침강속도를 W_p라고 한다면, 침강에 의한 연직 flux는 다음과 같이 표현된다.

식물플랑크톤의 침강 플럭스 = $W_p \cdot \frac{\partial P}{\partial z}$ (2.54)

(8) **저서생물에 의한 섭식**

저서동물에 의한 식물플랑크톤의 여과포식을 표현하면, 포식에 의해 하루에 소실되는 식물플랑크톤생물량의 부분을 모델에서 다음과 같이 포함하였다.

$$B_{21}=v_{11}(T) \cdot P(mgC/m^3day) \quad (2.55)$$

2) 동물플랑크톤 구성요소(Z)

식물플랑크톤 구성요소와 같이 평균적인 단일 동물플랑크톤 군집을 대상으로 한다. 동물플랑크톤 생물량(Z)의 시간에 따른 농도변화를 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{dZ_i}{dt} = B_4 + B_8 - B_9 - B_{10} - B_{11} - B_{22} \pm B_{12} \quad (2.56)$$

즉, 동물플랑크톤의 시간변화량은 {섭식에 의한성장 - 배분 및 배설 - 사망 - 포식 ± 일주연직이동에 의한 공간적인 수량변동}으로 표현하였다.

$B_4 = \sum_{j=1}^{NZ} \mu_8(P, POC, SQN) \cdot v_4^j(P, POC) \cdot Z_j$: 식물플랑크톤의 섭식

$B_8 = \frac{POC}{\sum P + POC} \cdot v_4(P, POC) \cdot Z$: 현탁유기물 섭식

$B_9 = (1-e) \cdot v_4(P, POC) \cdot Z$: 배분

$B_{10} = v_5(T, P, POC) \cdot Z$: 배설

$B_{11} = \delta \cdot Z^2$: 자연사망

$B_{22} = v_{11}(T) \cdot Z$: Bentos에 의한 포식

$B_{12} = w_z(t) \cdot \frac{\partial P}{\partial z}$: 일주연직 이동

(1) **섭식**

동물플랑크톤의 섭식에 대해서는 많은 연구가 이루어졌으며, 일반적으로 먹이의 섭취는 시료의 여과율이나 수중의 시료농도의 함수라는 사실은 이미 알려져 있다. 植食性 동물플랑크톤 섭식에 관한 Parson 등(1967)의 연구에 의하면, 이료 농도가 어느 값 이하로 되면 섭이가 이루어지지 않는 하한치가 있고, 또 filter의 능력에도 많은 먹

이를 섭취하여 소화하는 것이 불가능한 상한값이 존재한다.

이러한 관계를 Ivlev(1945)는 다음 식으로 나타내었다.

$$R = R_{max} [1 - \exp\{\lambda(\Pi^* - \Pi)\}] \quad (2.57)$$

여기서, R : 동물플랑크톤의 섭식속도(day^{-1})

R_{max} : 최대섭식속도(day^{-1})

λ : Ivlev 정수($(mgC/m^3)^{-1}$)

Π^* : 한계치(mgC/m^3)

Π : 이료의 농도(mgC/m^3)

최대섭식속도에 관해서는 지수곡선형 온도응답을 고려하여 식 (2.55)를 다음과 같이 표현하였다.

$$R_{max} = \alpha_3 \cdot \exp(\beta_3 \cdot T) \quad (2.58)$$

여기서, α_3 : 0℃에 있어서 최대섭취속도

β_3 : 온도계수(℃-1 : ln Q10/10)

본래 동물플랑크톤은 포식자이고, 이용하는 먹이로는 식물플랑크톤 뿐만 아니라 detritus를 포함한 현탁유기물 전체가 고려되나, 그것에 대해서 선택적으로 섭취하는 부분이 어느 정도인지 명확하지가 않기 때문에, 여기서는 간단하게 식물플랑크톤만을 포식의 대상으로 한다. 따라서 동물플랑크톤 섭식속도는 다음과 같이 표현된다.

$$v_3(T,P) = \alpha_3 \cdot \exp(\beta 3 \cdot T)[1-\exp\{\lambda(P^*-P)\}] \quad (2.59)$$

(2) 排泄 및 排糞

攝餌에 의해서 동물플랑크톤 체내로 들어온 N, P는 糞塊 또는 尿의 형태로 생체 내로부터 배설된다. Conover(1966)는 Calanus hyperboreus의 배설이 섭취량에 대해서 일정한 비율로 행해진다고 하였다. 또 최근의 연구에서는 Bulter등(1970)이 Clyde海에서 채집한 요각류 *Calanus finmarchicus* 糞塊 중에서 인량을 7~27% body phosphorus로 보고하였다.

糞塊의 형태로 배출된 N, P는 detritus로, 尿로서 배출된 N, P는 무기영양염으로 각각 환원된다. 이러한 대사활동에 의한 소실량을 평가하는 데에는 동물플랑크톤의 攝餌量과 동화효율(assimilation efficiency) 및 성장효율(growth efficiency)의 지표로 이용하는 것이 적절할 것이다.

이 지표들과 排糞量, 排尿量의 관계는 다음과 같다.

攝餌量 × (1 - 소화효율) = 排糞量

$$\frac{\text{攝餌量} - (\text{排糞量} + \text{排泄量})}{\text{攝餌量}} = \text{총성장효율} \tag{2.60}$$

이상의 설명을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\text{배분에 의한 N, P의 소실량} = (1 - \mu)\cdot v_3(T)\cdot Z \tag{2.61}$$

$$\text{배설에 의한 N, P의 소실량} = (\mu - \nu)\cdot v_3(T)\cdot Z \tag{2.62}$$

여기서, v : 총성장효율(%)

μ : 소화효율(%)

$v_3(T)$: 섭식속도(day-1)

Z : 동물플랑크톤 현존량(㎎C/㎥)

(3) **자연사망**

식물플랑크톤의 고사와 동일한 형태로 온도에 의존하는 자연사망속도 $v_5(T)$는 다음과 같이 표현된다.

$$v_5(T) = \alpha_5\cdot\exp(\beta_5\cdot T) \tag{2.63}$$

여기서, α_5 : 0℃에 있어서 사망속도(day^{-1})

β_5 : 온도계수($℃^{-1}$)

(4) **일주연직이동**

동물플랑크톤의 가장 현저한 생태학적 특징은 일주연직이동이다. 이 현상은 동물플랑크톤이 야간에는 표층으로 이동하고, 주간에는 하층으로 침강하는 것을 반복하는 것을 말한다. 수직이동은 침강과 동일하게 수직방향의 에너지운송의 중요한 역할을 담당하고 있다. 특히, 표층의 기초생산자와 중·하층의 육식성 동물을 연결시키는 역할로 동물플랑크톤의 존재는 중요하다. 그러나 수직이동의 메카니즘이나 적용성 평가에 있어서 적당한 식으로 표현하는 것은 곤란하지만, 본 모델에서는 주간의 하강은 시간에 따라서 변화하여 일사가 최대가 될 때에 최대로 된다고 가정하면, 하강속도 Wz(t)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W_z(t) = -W_{down}\cdot\sin\left\{\frac{\pi}{D}\cdot t\right\} \tag{2.64}$$

여기서, W_{down} : 최대하강속도(m/day)

D : 일조시간(day)

마찬가지로 야간의 상승속도 Wz(t)는 다음 식으로 표현된다.

$$W_z(t) = W_{up} \cdot \sin\left\{\frac{\pi}{1-D} \cdot (t-D)\right\} \quad (2.65)$$

여기서, W_{up} : 최대상승속도(m/day)이다.

3) 현탁 유기물 구성요소(POC)

본 모델에서 현탁 유기물 구성요소는 비생물의 입자상 유기물(detritus)을 의미하며, 탄소량 단위의 POC(㎎C/㎥)로 표현된다. 입자상 유기인(POP) 및 입자상 유기질소(PON)에 대해서는 현탁물 중의 C/P, C/N 조성비에 의해 POC로부터 환산된다. 현탁 유기물(POC) 구성요소의 시간변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d(POC)}{dt} = \sum_{i=1}^{NP} B_6^i + \sum_{i=1}^{NZ}(B_{11}^i + B_9^i - B_8^i) - B_{13} - B_{14} - B_{15} + q_{POC} \quad (2.66)$$

즉, POC의 시간변동량은 { 식물플랑크톤의 고사 +[동물플랑크톤의 자연사망 + 동물플랑크톤의 배분 - 동물플랑크톤에 의한 섭취] - 세균에 의한 분해 - 분해잔존물로의 변환 - 침강 + 시스템 외부부하)}로 표현할 수있다.

$B_{13} = v_9(T, DO) \cdot POC$: 세균에 의한 분해

$B_{14} = k \cdot B_{13}$: 분해잔존물의 생성

$B_{15} = w_{POC} \cdot \partial \frac{POC}{\partial z}$: 현탁 유기물의 침강

q_{POC} : 계외로부터의 부하

(1) 세균에의한 분해

현탁 유기물(detritus) 중의 영양소는 불용성의 무기영양염으로 되어 해저로 소실하거나 미생물이나 저생동물에 의해 이용되어 용존무기영양염으로 환원하는 것으로 알려져 있다. 본 모델에서는 세균에 의한 분해를 거쳐서 계내를 재순환하는 것으로 한다. 또한 현탁 유기물에 대해서는 분해, 용존 유기물에 대해서는 무기화라는 단어를 사용하기도 하지만, 모두가 세균에 의한 이용이라는 점에서 같다. 그러나 분해속도와 무기화 속도가 같은 것은 아니다.

현탁 유기물의 분해속도는 다음과 같이 표현된다. 세균의 작용에 의한 Detritus의 직접 무기화과정에 관한 모델은

$$B_{13} = v_9(T, DO) \cdot POC \tag{2.67}$$

로 나타낼 수있다.

여기서, v_9 : 온도 T와 용존산소량 DO에 의존하는 POC의 분해속도

분해속도의 온도 응답에 관해서 지수함수형으로 표현하면,

$$v_9 = \alpha_5 \cdot \exp(\beta_5 \cdot T) \tag{2.68}$$

용존산소에 관한 의존성에대해서는 산소농도가 저하됨에 따라 분해가 저해되는 효과를 쌍곡선표선인 DO/(DO_0+DO)의 형태로 표현하였다. 따라서, 최종적으로,

$$v_9 = (T, DO) = \alpha_5 \exp(\beta_5 \cdot T) \frac{DO}{DO_0 + DO} \tag{2.69}$$

(2) **분해잔존물의 생성**

Detritus의 배부분은 세균의 작용에 의해 무기화되지만, Humin같은 난분해성의 부분같은 유기물의 어떤부분은 무기화되어 용존 유기물로 이행된다고 볼 수 없다. 그 과정을 모델하는 것은 간단한데,

$$B_{14} = k \cdot B_{13} \tag{2.70}$$

의 형태로 표현할 수 있다. 여기서, k는 Detritus의 직접무기화량에 대하여 잔존물 생성의 부분을 나타낸다.

(3) **침강**

수식화는 식물플랑크톤의 경우와 같으며 침강속도를 W_{POC}라고 하면, 침강에 의해서 해저로 소실하는 현탁 유기물의 flux는 다음과 같다.

$$W_{POC} \cdot \frac{\partial(POC)}{\partial z} \tag{2.71}$$

4) 용존 유기물 구성요소(DOC)

용존 유기물(DOM) 구성요소는 용존 유기물의 경우와 같이 DOC, DOP, DON의 3가지 형태로 고려된다. 계산은 DOC 탄소량 단위를 상태변수로 사용하여, 원소조성비 P_h/C비와 N/C비로 용존 유기인(DOP) 및 용존 유기질소(DON)를 환산한다. DOC의

시간변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d(DOC)}{dt} = \sum_{i=1}^{NP} B_3^i + B_{14} - B_{16} + q_{DOC} \tag{2.72}$$

용존유기탄소의 시간변동량은 {식물플랑크톤의 세포외 분비량 + 현탁 유기물의 분해로 인한 생성 - 용존 유기물의 무기화 + 계외로부터 유입}으로 표현하였다.

여기서, $B_{16} = v_{10}(T, DO) \cdot DOC$: 용존유기물의 무기화

세균에 의한 용존유기물의 무기화에 관해 현탁 유기물과 같은 형태의 모델에서는 온도와 용존산소농도에 관한 의존성을 고려하여, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{10}(T, DO) = \alpha_6 \cdot \exp(\beta_6 T) \frac{DO}{DO_1 + DO} \tag{2.73}$$

5) 인산염(PO_4^{3-}-P)

인산인(PO_4^{3-}-P)의 생물과정에 관한 수식화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dPO_4}{dt} = & \sum_{i=1}^{NP}(-B_2^i + [P:C_P]_i B_5^i) + \sum_{j=1}^{NZ}(-B_{10}^j + [P:C_{POM}]_i B_{12}) \\ & + [P:C_{DOM}]_i B_{16} + \sum_{i=1}^{NP}(B_4^i + B_{22}^i + B_6^i) \cdot \frac{SQP_i}{P_i} + B_{28} + q_{PO_4} \end{aligned} \tag{2.74}$$

인산인의 시간변동량은 {- 식물플랑크톤에 의한 섭취 + 식물플랑크톤의 호흡 + 동물플랑크톤의 배설 + 현탁 유기물의 분해 + 용존 유기물의 무기화 + 퇴적물로부터의 용출 + 계외로부터 공급}등으로 표현할 수 있다.

여기서, $B_{28} = v_{14}(T, DO)/h$: 퇴적물로부터의 용출

영양염 동태에서 중요한 영향을 주는 생물과정의 하나로, 퇴적물로부터의 용출이 있다. 이 용출은 해저의 입도조성이나 유기물 퇴적상황 등의 물리적 성상, 저생생물의 개체군밀도, 퇴적물 온도나 영양염 농도 등의 생물학적, 화학적 성상에 의존하며, 이 기구는 매우 복잡하다. 따라서, 여기서는 저생생물의 배설과 미생물학적인 영양염의 회귀를 주체로 고려하였다. 해저로부터 하루에 인 Flux는 v_{14}(단위 : ㎎/㎡ · day)로 인산염의 Compartment에 더해준다. v_{14}는 저층의 수온 T와, 용존산소 농도 DO에 의존하며, 다음의 형태로 표현할 수있다.

$$v_{14}(T, DO) = \alpha \cdot \exp(\beta_8 \cdot T - \gamma_P \cdot DO) \tag{2.75}$$

여기서, γ_P : DO 농도에 의존하는 용출억제를 나타내는 파라메타

용출의 온도의존에 관해서는 Kremer & Nixon(1978)에 나타나 있다.

6) 용존무기질소(NH_4, NO_2, NO_3)

모델에서 대상으로 하는 용존무기질소(DIN)는 암모니아질소(NH_4^+-N), 아질산질소(NO_2^--N), 질산질소(NO_3^--N)의 3가지 형태이다. 형태의 구별은 고려하지 않았다. DIN의 생물과정에 관한 수식화는 다음과 같다.

용존무질 질소의 시간변동량은 3가지 형태의 무기질소에 따라 다소 다른 양상을 보인다. 암모니아질소의 경우{- 식물플랑크톤에 의한 섭취 + 식물플랑크톤의 호흡 + 동물플랑크톤의 배설 + 현탁 유기물의 분해 + 용존 유기물의 무기화 + 계외로부터 공급}등으로 설명할 수 있고, 아질산질소의 경우는 {현탁 유기물의 분해 + 용존 유기물의 무기화 + 계외로부터 공급}이며, 질산질소의 경우는 {- 식물플랑크톤에 의한 섭취 + 현탁 유기물의 분해 - 탈질소화 + 계외로부터 공급}으로 요약할 수있다.

$$\begin{aligned}\frac{dNH_4}{dt} = & \sum_{i=1}^{NP}(-B^i_{2,NH4}+[N:C_P]_iB^i_6)+\sum_{j=1}^{NZ}(B^j_{10}+[N:C_{POM}]B_{12}) \\ & +[N:C_{DOM}]B_{16}+\sum_{i=1}^{NP}(B^i_4+B^i_{21}+B^i_6)\cdot\frac{SQN_i}{P_i} \\ & -B_{17}+B_{20}+B_{29}+q_{NH_4}\end{aligned} \tag{2.76a}$$

$$\frac{dNO_2}{dt} = B_{17}-B_{18}+q_{NO2} \tag{2.76b}$$

$$\frac{dNO_3}{dt} = \sum_{i=1}^{NP}-B^i_{2,NO3}+B_{18}-B_{20}+q_{NO_3} \tag{2.76c}$$

여기서, $q_{NH_4}, q_{NO2}, q_{NO_3}$: 계외부로부터의 부하

B_{17} : 암모니아로부터 아질산으로의 질화속도

B_{18} : 아질산에서 질산으로의 질화속도

B_{20} : 질산환원과정에서, 질소가스로 계외부로 나가는 부분

B_{29} : 퇴적물로부터의 암모니아 용출량

(1) 퇴적물로부터의 암모니아질소의 회귀

인산염과 마찬가지로, 이 모델에서는 암모니아질소의 Flux가 수중의 암모니아

Compartment로 추가되도록 하였다. 해저로부터 암모니아의 Flux는 수온과 용존산소 농도의 함수이다.

$$B_{29} = v_{15}(T, DO)/h$$

$$v_{15}(T, DO) = \alpha_9 \cdot \exp(\beta_9 \cdot T - \gamma_N \cdot DO) \tag{2.75}$$

여기서, γ_N : DO 농도에 의존하는 용출 억제효과를 나타내는 파라메타

v_{15} : 단위면적당의 질소 Flux(㎎/㎡ · day)

(2) **질산화**

암모니아의 질산화과정에 관해서 모델에서는 1차 반응에 따라 다음과 같이 정식화하였다.

$$\frac{dNH_4}{dt} = -k_{NH_4} \cdot NH_4 \tag{2.76}$$

$$\frac{dNH_4}{dt} = -k_{NH_4} \cdot NH_4 - k_{NO_2} \cdot NO_2 \tag{2.77}$$

여기서, k_{NH4}, k_{NO2} : 암모니아와 아질산의 질산화 속도(/day)

이러한 속도계수는 질산화 세균의 활성에 관계되기 때문에 생리학적으로 온도응답의 형식화가 고려된다. 여기서는 유기물의 분해속도와 같은 요령으로 온도와 용존산소의 의존성을 고려하여 다음과 같이 나타내었다.

$$v_{16}(T, DO) = \alpha_{11} \cdot \exp(\beta_{11} T) \frac{DO}{DO_3 + DO} \tag{2.78}$$

$$v_{18}(T, DO) = \alpha_{12} \cdot \exp(\beta_{12} T) \frac{DO}{DO_4 + DO} \tag{2.79}$$

(3) **탈질소과정**

일반적으로 혐기적 조건하에서는 질소의 환원반응이 일어나서, 질산질소로부터 질소가스가 생성된다. 그 반응과정을 정식화는 아래와 같다.

$$\beta_{20} = v_{17} \cdot NO_3$$

$$v_{17}(T, DO) = \alpha_{10} \cdot \exp(\beta_{10} T) \tag{2.80}$$

탈질이 일어날 수 있는 용존산소의 농도로서 본 모델에서는 parameter DO_2를 설정하여, $DO > DO_2$가 될 때 탈질이 일어나도록 하였다.

7) 용존산소 (DO)

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

$$\frac{d(DO)}{dt} = D_1 - D_2 - D_3 - D_4 - D_5 - D_6 - D_7 - D_8 + D_9 \qquad (2.81)$$

즉, {광합성에 의한 공급 - 식물플랑크톤의 호흡에 의한 소비 - 동물플랑크톤의 호흡에 의한 소비 - 현탁 유기물의 분해에 의한 소비 - 용존 유기물의 무기화에 의한 소비 - 저니에 의한 산소소비 - 질산화에 따른 산소소비 + 재 폭기} 등으로 구분할 수있다.

산소의 생산에 기여하는 생물과정은 식물플랑크톤의 광합성이고, 산소소비의 생물과정은 동·식물플랑크톤의 호흡, 현탁 유기물의 분해, 용존 유기물의 무기화 및 퇴적물중 유기물에 의한 산소소비이다.

이들 생물과정의 수식화에서는 단위시간당의 탄소생산 혹은 탄소소비량이 구해지고 있기 때문에 이들을 산소의 생산 또는 소비량으로서 산출하는 데에는 각 구성요소의 산소 : 탄소 비를 환산계수로서 곱하면 된다. P, Z, POC와 DOC 중에서 어느 구성요소에 대해서도 체내의 영양소 조성비 (C : N : P)가 (m : n : l)에서 원자비인 경우, 이 유기물을 완전하게 산화하기 위해서 필요한 산소량을 이론적으로 구할 수 있다. 산화-환원반응은 다음과 같다.

$$(CH_2O)m(NH_3)nH_3PO_4 + (m+2n)O_2 \Leftrightarrow m(CO_2) + n(NO_3^-) + HPO_4^{2-} + (m+n)H_2O + (n+2)H^+ + \text{Trace Element} + \text{energy} \qquad (2.82)$$

따라서, TOD : C(중량비) = $\frac{32(m+n)}{12m}$ (2.83)

예를 들면, 식물플랑크톤의 체조성비로서 $C:N:P = 106:16:1$을 가정하면, [TOD : Cp] = 3.47이 얻어진다. 모델에 입력하는 단위에서는 탄소량이 ㎎C/㎥, 산소량이 ㎎/L이며, [TOD : Cp] = 3.47 $\times 10^{-3}$이 된다. 이렇게 결정되는 조성비 [TOD : C]가 필요한 환산계수이다.

(1) 광합성에 의한 산소공급(D_1)

광합성에 의한 식물플랑크톤의 탄소동화는 앞서 기술한 바와 같이,

$$\sum_{i=1}^{NP} B_1^i = \sum_{i=1}^{NP} v_1^i(T) \cdot \mu_1(P_i, SQP_i, SQN_i) \cdot \mu_2(I, P_i) \cdot P_i \ (\text{㎎C/㎥ · day})$$이다.

따라서, 산소공급량을 환산하면,

$$D_1 = \sum_{i=1}[\mathrm{TOD}: C_P]\mathrm{i}\, B_1^i \ (\mathrm{mgO_2/L \cdot day}) \tag{2.84}$$

(2) 플랑크톤의 호흡에 의한 산소소비(D_2, D_3)

호흡에 의한 탄소의 소실량으로서 식물플랑크톤은,

$$\sum_{i=1}^{NP} B_5^i = \sum_{i=1}^{NP} v_3^i(T) \cdot P_i$$

동물플랑크톤에서는,

$$\sum_{i=1}^{NZ} B_{10}^i = \sum_{i=1}^{NZ} v_5^i(T, P, POC) \cdot Z_j$$

따라서, 플랑크톤의 호흡에 따른 산소소비는,

$$D_2 + D_3 = \sum_{i=1}^{NP}[\mathrm{TOD}: C_P]_i B_5^i + \sum_{j=1}^{NZ}[\mathrm{TOD}: C_Z]_j B_{10}^j \tag{2.85}$$

(3) **유기물의 분해에 의한 산소소비**(D_4, D_5)

현탁 및 용존유기물의 분해에 따른 탄소소비는 각각,

$$B_{13} = v_9(T, DO) \cdot POC \ , \ B_{16} = (T, DO) \cdot DOC$$

따라서, 분해시의 산소소비량은,

$$D_4 + D_5 = [\mathrm{TOD}: C_{POM}] \cdot B_{13} + [\mathrm{TOD}: C_{DOM}] B_{16} \tag{2.86}$$

(4) **질산화에 의한 산소소비**(D_6, D_7)

암모니아의 질산화에 관해서는, *nitrococus*나 *nitrosomonas*등에 의한 질산화반응은,

$2NH_3 + 3O_2 \rightarrow 2HNO_2 + 2H_2O$

질소 1g 원자량에 대해, 48g의 산소소비가 계산된다. 따라서 암모니아의 질산화시 산소소비는,

$$D_6 = 0.048 \cdot B_{17} = 0.048 \cdot v_{18}(T, DO) \cdot NH_4 \tag{2.87}$$

같은 형태로 아질산의 산화에서는 *nitrobacter*에 의한 반응은,

$2NNO_3 + O_2 \rightarrow 2HNO_3$

질소 1g 원자량에 대해서, 16g의 산소가 소비되는 것을 알 수 있다. 따라서, 아질산의 질산화시의 산소소비는,

$$D_7 = 0.016 \cdot B_{18} = 0.016 \cdot v_{18}(T, DO) \cdot NO_2 \quad (2.88)$$

(5) **퇴적물에 의한 산소소비**(D_8)

퇴적물에 의한 산소소비는 세균에 의한 해저 퇴적물의 분해나 저생동물의 호흡, 질소의 산화반응 등의 다양한 형태의 인자가 관계되지만, 상세한 기구를 재현하기가 어렵기 때문에, 여기에서는 영양염의 용출 Flux와 같은 요령으로 해저에서 소비되는 산소 Flux를 용존산소 Compartmetnt에 적용하였다. 본 모델에서 퇴적물에 의한 산소소비량을 다음과 같이 표현한다.

$$D_8 = \frac{k_B}{h}$$

$$k_B = (k_B)_0 \cdot \exp\{\beta(T - T_B)\} \quad (2.87)$$

여기서, k_B : 퇴적물내의 탄소량(㎎C/㎥)

h : 직상수의 두께

$(k_B)_0$:수온 T=T_B에서의 산소소비속도

β : 온도계수

(6) **해면으로부터 폭기**(Aeration)**에 의한 공급**(D_9)

폭기에 의한 산소 flux는 다음과 같이 표현된다.

$$D_9 = K_a \cdot (DO_s - DO) \quad (2.88)$$

여기서, K_a : 재폭기계수(day^{-1})

DO_s :산소포화량(㎎/L)

본 모델에서는 DOs에 관해서 Fox식을 채택하고 있다.

$$O_2(\text{㎖}/L) = 10.291 - 0.2809T + 0.006009T^2 - 0.000063T^3 - Cl(0.1161 - 0.003922T + 0.000063T^{2)} \quad (2.89)$$

$$DO_{s(\text{㎎}/L)} = \frac{32 \times O_2(\text{㎖}/L)}{22.4(1 + T/273)} \quad (2.90)$$

8) 화학적 산소요구량(COD)

생태계 모델의 마지막 Compartment는 화학적 산소요구량(COD)이다. COD는 수중의 분해하기 쉬운 유기물의 존재량을 나타내는 지표로, 생물로써는 식물 및 동물플

랑크톤, 비생물로는 현탁유기물이나 용존유기물의 4가지 유기물 Compartment의 거동을 알면, COD의 시간변화를 알 수 있다. 따라서 위에서 설명한 각 생물과정의 수식화를 통해서 해역내의 각 형태의 유기물에 대한 단위시간당의 증감량이 구해진다. 즉, $(\frac{\partial P}{\partial t})^*$, $(\frac{\partial Z}{\partial t})^*$, $(\frac{\partial POC}{\partial t})^*$, $(\frac{\partial DOC}{\partial t})^*$ 가 유기물 변화량을 나타낸다.

이들은 탄소량으로 나타낸 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.

$$(\frac{\partial COD}{\partial t}) = [\mathrm{COD}:C_P]\cdot(\frac{\partial P}{\partial t})+[\mathrm{COD}:C_Z]\cdot(\frac{\partial Z}{\partial t})+[\mathrm{COD}:C_{POM}]\cdot(\frac{\partial POC}{\partial t})$$
$$+[\mathrm{COD}:C_{DOM}]\cdot(\frac{\partial DOC}{\partial t}) \qquad (2.91)$$

이들의 환산비를 어떻게 결정할 것인지가 문제이지만, 이 모델에서는 津田 등이 瀨戶內海의 실험에서 얻은 TOD : COD_{Acid} ≅ 2.26 : 1의 관계를 사용하여 TOD로부터 COD를 환산한다. 또한, 이 모델에서는 계외로부터의 COD 유입부하량을 q_{COD}로 나타내어 현탁, 용존유기물의 유입부하량을 q_{POC}, q_{DOC}사이의 다음의 관계가 성립되는 것을 판정하였다.

$$q_{COD} = [OCD : C_{POM}]\cdot q_{POC} + [COD : C_{DOM}]\cdot q_{DOC} \qquad (2.92)$$

2.3.3 생태계모델의 이산화

모델식의 이산화는, 공간미분항은 중앙차분, 이류항에 대하여는 風上差分 scheme을 사용하였다.

$$
\begin{aligned}
&\frac{1}{\Delta t}\left(t^t_{i,j,k}B^{t+\Delta t}_{i,j,k}-h^t_{i,j,k}B^t_{i,j,k}\right)\\
&=\frac{1}{2\Delta x_i}\left\{M^t_{i,j,k}\left(B^t_{i-1,j,k}+B^t_{i,j,k}\right)+\left|M^t_{i,j,k}\right|\left(B^t_{i-1,j,k}-B^t_{i,j,k}\right)\right.\\
&\left.-M^t_{i+1,j,k}\left(B^t_{i,j,k}+B^t_{i+1,j,k}\right)-\left|M^t_{i+1,j,k}\right|\left(B^t_{i,j,k}+B^t_{i+1,j,k}\right)\right\}\\
&+\frac{1}{2\Delta y_i}\left\{N^t_{i,j+1,k}\left(B^t_{i,j+1,k}+B^t_{i,j,k}\right)+\left|N^t_{i,j+1,k}\right|\left(B^t_{i,j+1,k}-B^t_{i,j,k}\right)\right.\\
&\left.-N^t_{i,j,k}\left(B^t_{i,j,k}+B^t_{i,j-1,k}\right)-\left|N^t_{i,j,k}\right|\left(B^t_{i,j,k}+B^t_{i,j-1,k}\right)\right\}\\
&+\frac{1}{2}\left\{\left(w^{t+\Delta t}_{i,j,k}+w_s\right)+\left|w^{t+\Delta t}_{i,j,k}+w_s\right|-\left(w^{t+\Delta t}_{i,j,k-1}+w_s\right)-\left|w^{t+\Delta t}_{i,j,k-1}+w_s\right|\right\}\cdot B^{t+\Delta t}_{i,j,k}\\
&+\frac{1}{2}\left\{\left(w^{t+\Delta t}_{i,j,k}+w_s\right)+\left|w^{t+\Delta t}_{i,j,k}+w_s\right|\right\}\cdot B^{t+\Delta t}_{i,j,k+1}\\
&+\frac{1}{2}\left\{-\left(w^{t+\Delta t}_{i,j,k-1}+w_s\right)-\left|w^{t+\Delta t}_{i,j,k-1}+w_s\right|\right\}\cdot B^{t+\Delta t}_{i,j,k-1}\\
&+\frac{1}{\Delta x_i}\left\{\left(h_x\right)^t_{i,j,k}\cdot\left(K_y\right)_{i,j}\cdot\frac{B^t_{i+1,j,k}}{\Delta x_{i+1}}-\left(h_x\right)^t_{i,j,k}\cdot\left(K_x\right)_{i,j}\cdot\frac{B^t_{i,j,k}-B^t_{i-1,j,k}}{\Delta x_{i+1}}\right\}\\
&+\frac{1}{\Delta y_i}\left\{\left(h_x\right)^t_{i,j,k}\cdot\left(K_y\right)_{i,j}\cdot\frac{B^t_{i,j-1,k}}{\Delta y_{i+1}}-\left(h_x\right)^t_{i,j+1,k}\cdot\left(K_x\right)_{i,j+1}\cdot\frac{B^t_{i,j,k}-B^t_{i,j+1,k}}{\Delta y_{i+1}}\right\}\\
&+\frac{\left(K_z\right)_{i,j,k+1}}{\overline{\Delta z_{k+1}}}\cdot B^{t+\Delta t}_{i,j,k+1}+\left\{\frac{\left(K_z\right)_{i,j,k}}{\overline{\Delta z_z}}+\frac{\left(K_z\right)_{i,j,k+1}}{\overline{\Delta z_{k+1}}}\right\}\cdot B^{t+\Delta t}_{i,j,k}\\
&+\frac{\left(K_z\right)_{i,j,k}}{\overline{\Delta z_k}}\cdot B^{t+\Delta t}_{i,j,k-1}+h^t_{i,j,k}\left\{\left(\frac{dB}{dt}\right)^*\right\}^t_{i,j,k}
\end{aligned}
\tag{2.93}
$$

여기서, Δt : 시간간격

(i, j, k) : 각변량, 물리량의 정의점

Δx_i , Δy_i , Δz_i : 각각 x, y, z 방향의 격자폭, 층두께(Fig. 2.6)

또,

$$
\begin{aligned}
\overline{\Delta x_i}&=\frac{1}{2}\left(\Delta x_{i-1}+\Delta x_i\right)\\
\overline{\Delta y_i}&=\frac{1}{2}\left(\Delta y_{i-1}+\Delta y_i\right)\\
\overline{\Delta z_k}&=\frac{1}{2}\left(\Delta z_{k-1}+\Delta z_k\right)\\
\Delta z_k&=h_k
\end{aligned}
$$

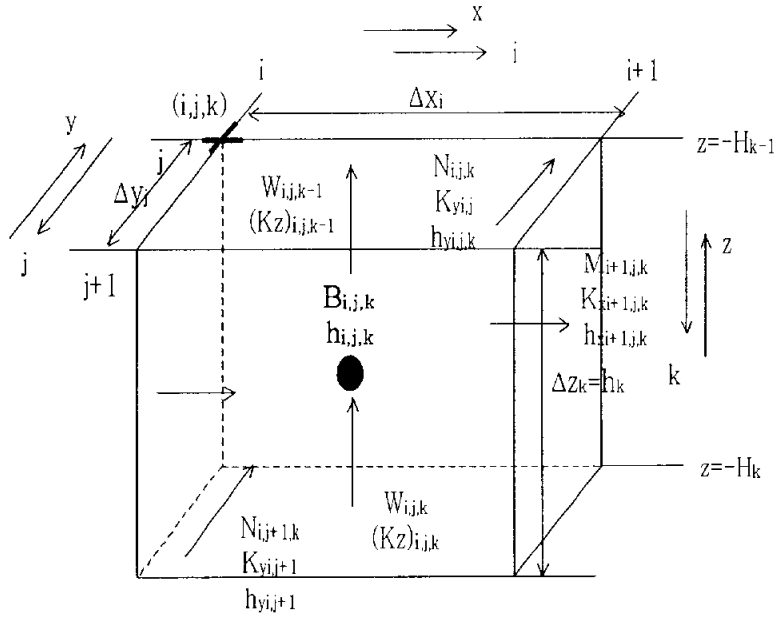


Fig. 2.7. Grid arrangement in EUTROP ecological model for calculate each biological compartment(Yokoyama, 1994)

이상의 이산식은 수평면내의 각 (i, j) 격자 내에서, 연직 방향으로, $B^{t+\Delta t}_{i,j,k}$(k=1, 2, …, K_{maxi})를 미지수에 대하여 선형방식계를 형성하고, 그것을 정리하면,

$$a_k \cdot B^{t+\Delta t}_{i,j,k+1} + b_k \cdot B^{t+\Delta t}_{i,j,k} + c_k \cdot B^{t+\Delta t}_{i,j,k-1} = f^t_{i,j,k} \tag{2.94}$$

$$\begin{bmatrix} b_1 & a_1 & & & & & \\ c_2 & b_2 & a_2 & & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & & \\ & & c_k & b_k & a_k & & \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ 0 & & & & C_{Kmax} & b_{Kmax} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B^{t+\Delta t}_{i,j,1} \\ B^{t+\Delta t}_{i,j,2} \\ \vdots \\ B^{t+\Delta t}_{i,j,k} \\ \vdots \\ B^{t+\Delta t}_{i,j,MAX} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f^t_{i,j,1} \\ f^t_{i,j,2} \\ \vdots \\ f^t_{i,j,k} \\ \vdots \\ f^t_{i,j,k_{MAX}} \end{bmatrix} \tag{2.95}$$

이 식의 계수행열은 삼중대각행열이며, 축차대입법에 의해 효율적인 계산이 가능하다. 이상의 조작을 통해서 수평면내의 (i, j) 격자에 대해서 실행하면, 시간 t=Δt 에서의 현존량 $B_{i,j,k}$가 결정된다. 위의 식에서 음해법 부분의 계수 a, b, c는,

$$a_k = -\frac{1}{2}\{(w_{i,j,k}^{t+\Delta t} + w_s) + |w_{i,j,k}^{t+\Delta t} + w_s|\} - \frac{(K_z)_{i,j,k+1}}{\overline{\Delta z_{k+1}}}$$

$$b_k = \frac{h_{i,j,k}^{t+\Delta t}}{\Delta t} - \frac{1}{2}\{(w_{i,j,k}^{t+\Delta t} + w_s) + |w_{i,j,k}^{t+\Delta t} + w_s| - (w_{i,j,k-1}^{t+\Delta t} + w_s) - |w_{i,j,k-1}^{t+\Delta t} + w_s|\} + \frac{(K_z)_{i,j,k+1}}{\overline{\Delta z_{k+1}}}$$

$$c_k = -\frac{1}{2}\{(w_{i,j,k-1}^{t+\Delta t} + w_s) + |w_{i,j,k-1}^{t+\Delta t} + w_s|\} - \frac{(K_z)_{i,j,k}}{\overline{\Delta z_{k+1}}}$$

또, 양해법 부분의 f는,

$$f_{i,j,k}^t = D_{i,j,k} \cdot B_{i-1,j,k}^t + E_{i,j,k} \cdot B_{i,j-1,k} + F_{i,j,k} \cdot B_{i-1,j,k}^t \quad \cdot$$
$$G_{i,j,k} \cdot + B_{i,j-1,k} + H_{i,j,k}^t \cdot B_{i,j,k} + h_{u,j,k}^t \left\{ \left(\frac{dB}{dt}\right)^* \right\}_{i,j,k}^t$$

여기서,

$$D_{i,j,k} = \frac{1}{2}\Delta x_i (M_{i+1,j,k}^t - |M_{i+1,j,k}^t|) + \frac{(h_x)_{i+1,j,k}^t \cdot (K_x)_{i+1,j}}{\Delta x_i \cdot \overline{\Delta x_{i+1}}}$$

$$E_{i,j,k} = \frac{1}{2}\Delta y_i (N_{i,j+1,k}^t - |N_{i,j+1,k}^t|) + \frac{(h_y)_{i,j+1,k}^t \cdot (K_y)_{i,j+1}}{\Delta y_j \cdot \overline{\Delta y_{j+1}}}$$

$$F_{i,j,k} = \frac{1}{2}\Delta x_i (M_{i,j,k}^t - |M_{i,j,k}^t|) + \frac{(h_x)_{i,j,k}^t \cdot (K_x)_{i,j}}{\Delta x_i \cdot \overline{\Delta x_i}}$$

$$G_{i,j,k} = \frac{1}{2}\Delta y_i (N_{i,j,k}^t - |N_{i,j,k}^t|) + \frac{(h_y)_{i,j,k}^t \cdot (K_y)_{i,j}}{\Delta y_j \cdot \overline{\Delta y_j}}$$

$$H_{i,j,k}^t = \frac{h_{i,j,k}^t}{\Delta t}$$
$$+ \frac{1}{2}\Delta x_i (M_{i,j,k}^t - |M_{i,j,k}^t| - M_{i+1,j,k}^t - |M_{i+1,j,k}^t|)$$
$$+ \frac{1}{2}\Delta y_i (N_{i,j+1,k}^t - |N_{i,j+1,k}^t| - N_{i,j,k}^t - |N_{i,j,k}^t|)$$
$$- \frac{(h_x)_{i+1,j,k}^t \cdot (K_x)_{i+1,j}}{\Delta x_i \cdot \overline{\Delta x_{i+1}}} + \frac{(h_x)_{i,j,k}^t \cdot (K_x)_{i,j}}{\Delta x_i \cdot \overline{\Delta x_i}}$$
$$- \frac{(h_y)_{i,j,k}^t \cdot (K_y)_{i,j}}{\Delta y_j \cdot \overline{\Delta y_j}} + \frac{(h_y)_{i,j+1,k}^t \cdot (K_y)_{i,j+1}}{\Delta y_j \cdot \overline{\Delta y_{j+1}}}$$

2.3.4 생물 parameters

생태계모델의 수식화에 나타난 생물 parameters의 기호, 정의 및 단위는 Table 2.2와 같이 정리할 수 있다.

Table 2.2. The definition of biological parameters used in an ecosystem model

Parameters	Nomenclature	Units
Phytoplankton		
Maximum growth rate	G_{max}, β_{Gmax}	day^{-1}, $℃^{-1}$
Maximum nutrient uptake rates	UP_{max}, UN_{max}	day^{-1}
Half saturation constants for nutrient uptake	K_{PO4}, K_{NO3}, K_{NH4}	$\mu M \cdot L^{-1}$
Ammonium inhibition factor for nitrate uptake	Ψ	$L \cdot \mu M^{-1}$
Maximum capacity of cell quota	PQP_{max}, PQN_{max}	*ratio*
Maximum surface radiation	J_{max}	$cal \cdot cm^{-2} \cdot day^{-1}$
Daytime length	DL	*day*
Photosynthetic light optimum	I_{OPT}	$cal \cdot cm^{-2} \cdot day^{-1}$
Light extinction coefficient	k	m^{1}
Fraction of extracellular release	Ext_0, β_{EXT}	-
Respiration rate	P_{RESP}, β_{PRESP}	day^{-1}, $℃^{-1}$
Sinking rate of living cells	w_P	$m \cdot day^{-1}$
Rate of natural mortality	P_{MOT}, β_{PMOT}	$m^3 \cdot mgC^{-1} day^{-1}$, $℃^{-1}$
C/Chl-a ratio	Chl-a:C	*by weghit*
C/P, C/N ratios except for cell quota	[C:P], [C:N]	*by weghit*
O/C ratio	λ_P	$mgO_2 \cdot C^{-1} day^{-1}$
COD/C ratio	γ_P	$mgCOD \cdot C^{-1} day^{-1}$

Table 2.2. The definition of biological parameters used in an ecosystem model (continued)

Parameters	Nomenclature	Units
Zooplankton		
Maximum ration	R_{max}, β_{Gmax}	day^{-1}, $℃^{-1}$
Ivlev's constant	λ	$m^3 mg \cdot C^{-1}$
Feeding threshold	Π	$mgC \cdot m^{-3}$
Rate of basic metabolism	Z_{RESP}, β_{ZRESP}	day^{-1}, $℃^{-1}$
Energy expenditure in grazing activity	η	-
Assimilation efficiency	e	%
Rate of natural mortality	Z_{MOT}, β_{ZMOT}	$m^3 \cdot mgC^{-1} day^{-1}$, $℃^{-1}$
C/P, *C/N* ratios	[C:P], [C:N]	*by weghit*
O/C ratio	λ_Z	$mgO_2 \cdot C^{-1} day^{-1}$
COD/*C* ratio	γ_Z	$mgCOD \cdot C^{-1} day^{-1}$
Detrital carbon		
Mineralization rate	V_{POC}, β_{POC}	day^{-1}, $℃^{-1}$
Oxygen limitation	DO_{POC}	$mgO_2 \cdot L^{-1}$
Fraction of biodegradation	κ	-
C/P, *C/N* ratios	[C:P], [C:N]	by weghit
O/C ratio	λ_{DOC}	$mgO_2 \cdot mgC^{-1}$
COD/*C* ratio	γ_{DOC}	$mgCOD \cdot mgC^{-1}$
Sinking rate	w_{POC}	$m \cdot day^{-1}$
DissolÕed organic carbon		
Mineralization rate	V_{DOC}, β_{DOC}	day^{-1}, $℃^{-1}$
Oxygen limitation	DO_{DOC}	$mgO_2 \cdot L^{-1}$
C/P, *C/N* ratio	[C:P], [C:N]	by weghit
O/C ratio	λ_{DOC}	$mgO_2 \cdot mgC^{-1}$
COD/C ratio	γ_{DOC}	$mgCOD \cdot mgC^{-1}$
Others		
Nitrification rate of ammonium	k_{NH4}, β_{NH4}	day^{-1}, $℃^{-1}$
Oxygen limitation	DO_{NH4}	$mgO_2 \cdot L^{-1}$
Nitrification rate of nitrite	k_{NO2}, β_{NO2}	day^{-1}, $℃^{-1}$
Oxygen limitation	DO_{NO2}	$mgO_2 \cdot L^{-1}$
Aeration rate	k_a	day^{-1}

Ⅲ. 재료 및 방법

3.1 대상해역 및 현장관측

연구대상해역인 통영-사량도 해역의 현황조사는 Fig. 3.1에 나타낸 바와 같이 6개 조사정점에서 적조발생 전인 2002년 7월 초순경부터 시작하였고, 7월말인 7월 29일부터 집중조사를 실시하였다.

수질조사항목과 분석법은 다음과 같다.

1) 수온과 염분 : YSI-6000으로 현장측정하였다.

2) pH : pH meter(Orion 720 A)로 측정하였다.

3) 투명도 : Secchi disk로 현장측정하였다.

4) 총부유물질(TSS) : Whatman GF/C 여과지를 사용해 여과 건조후 무게차로 정량하여 계산하였다.

5) 화학적산소요구량(COD) : 알칼리성 과망간산 칼륨법으로 정량하였다.

6) 용존산소(DO) : YSI-6000으로 현장측정하였다.

7) 암모니아질소(NH_4^+-N) : Indophenol법에 의해 비색정량하였다.

8) 질산질소(NO_3^--N) : 카드뮴 환원법에 의해 비색정량하였다.

9) 아질산질소(NO_2^--N) : NED법에 의해 비색정량하였다.

10) 용존무기질소(DIN) : NH_4^+-N + NO_3^--N + NO_2^--N로 계산하였다.

11) 인산인(PO_4^{3-}-P) : 아스코르브산법에 의해 비색정량하였다.

12) Chlorophyll a : Strickland and Parson법에 의해 비색정량하였다.

13) 입자유기탄소(POC) : GF/F 여과지로 시수 일정량을 여과하여 걸러진 여과지를 CHN analyzer(Perkin-Elmer2400)로 정량하였다.

14) 용존유기탄소(DOC) : 시수를 GF/F 여과지로 여과한 후 여액을 TOC meter(Dohrman)로 정량하였다.

그 밖의 자료들은 '한국해양조사연보'(NFRDI, 2002), '통영시 환경기본계획'(통영시, 2002), '통영해역의 바다목장 연구개발용역사업 보고서'(해양수산부, 1998), '통영지역 방제실행계획'(해양경찰청, 2001), '북만의 양식어장 수용력에 관한 조사연구'(경상남도,

1996)를 참고하였다.

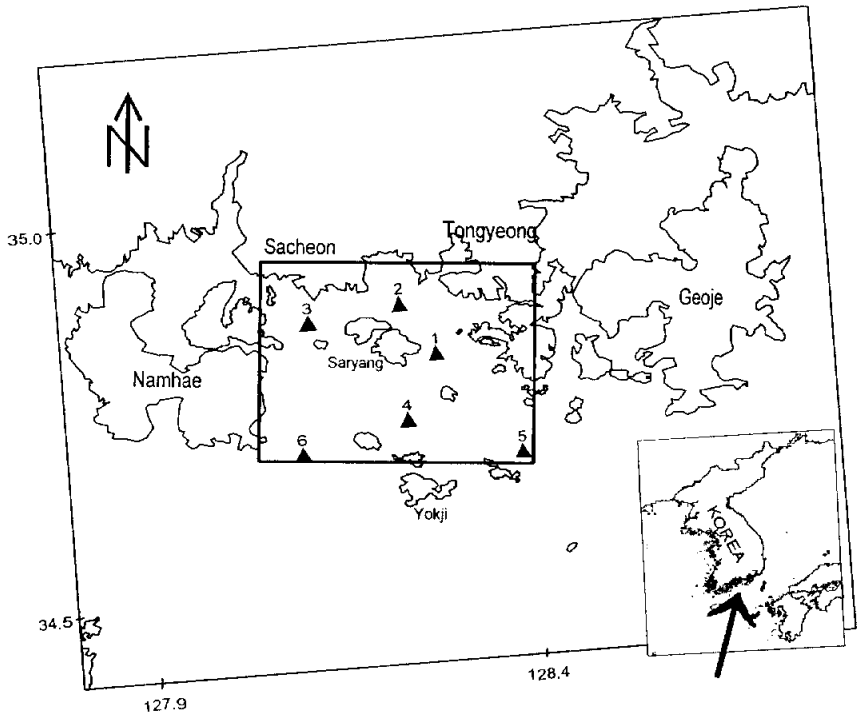


Fig. 3.1. Station map of field observation for water sample collected.

St.1(128.286E 34.805N), St.2(128.243E 34.872N), St.3(128.122E 34.856N)

St.4(128.243E 34.720N), St.5(128.389E 34.669N), St.6(128.103E 34.685N)

3.2 해수유동장의 재현

3.2.1 Model 영역

모델영역은 Fig. 3.2와 같이 유한차분 계산격자로 나누어 계산을 수행하였다. 적조의 발생 및 변동특성을 재현하고, 식물플랑크톤의 극대역의 변동과 이동경로를 관찰하기 위해서는 모델영역을 제주도 북단을 포함한 남해의 전 영역이나(권, 2001), 광역해역(이, 2000)을 포함하는 것이 더욱 타당하나, 보다 넓은 영역에서의 생태계 변동은 바람이나 해류와 같은 물리적인 외력에 의해 좌우되는 부분이 크다고 여겨진다(권, 2001). 여기에서는 해마다 적조에 의한 수산피해를 크게 입고 있으며(김 등, 1999; 임

등, 2001), 가두리 양식장과 패류 양식장이 밀집해 있는 통영-사량도 인근 해역을 모델 영역으로 설정하여, 해양 오염의 진행과 적조생태계 발생특성과의 관계를 설명하고, 차후의 연안관리에 적용하기 위해(Yanagi, 1997), 개방경계를 삼천포 수도, 남해-창선 해협, 남해도 남단에서 두미도 서안까지, 두미도 동안에서 외부지도 동안을 경유하여 미륵도 남단까지, 그리고 통영 해협 연결한 선으로 하였다. 격자는 X방향으로 83개, Y방향으로 67개, Z방향으로는 3층으로 격자망을 구성하고, 하나의 격자크기는 X, Y방향으로 각각 500m로 하였다(Table 3.1). 모델의 중요한 입력자료인 수심은 해도(한국판 해도 No. 224B, No. 229)를 이용하였으며, 이를 이용한 3차원 해저 지형도를 Fig. 1에 나타내었다.

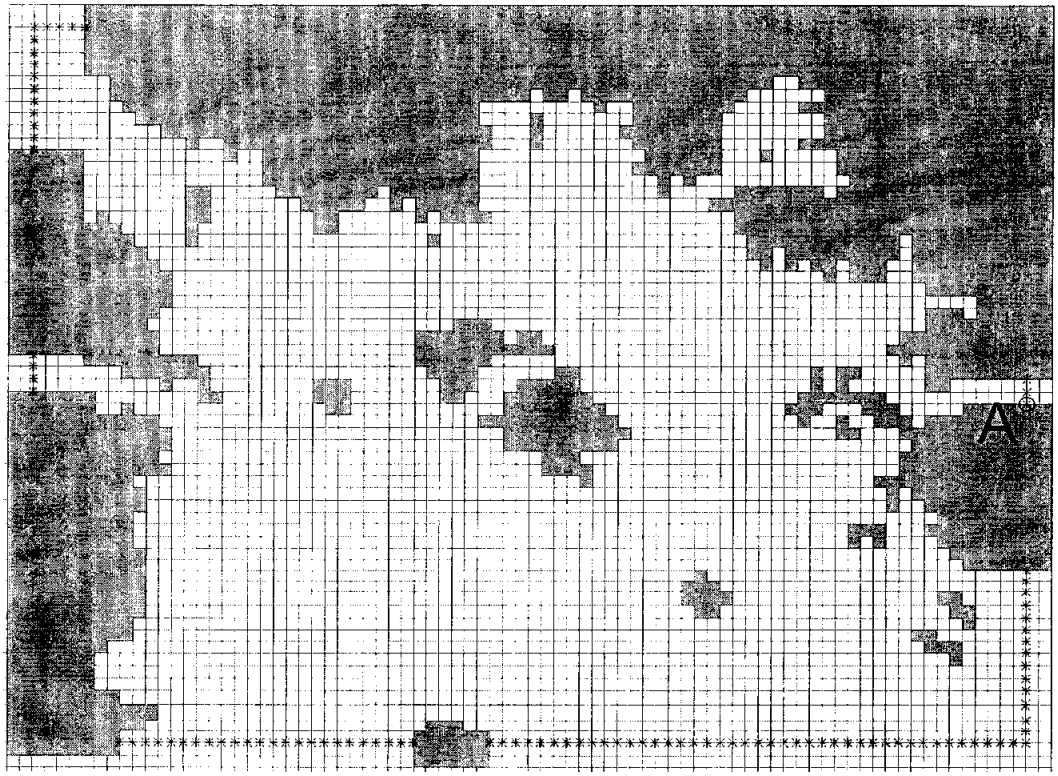


Fig. 3.2. Finite-difference grid of the three-dimensional model in the TongYeong sea area(' * ' : Open boundary grid line, A: Compare the real time tidal hight).

3.2.2 해수유동모델의 입력자료

모델영역 내의 해수유동을 재현하기 위해서 입력한 자료는 Table 3.1과 같다. 개방경계에서의 조위는 4대 분조(M_2, S_2, O_1, K_1)를 이용하였으며, 조위와 위상의 값은 해양수산부(1997)의 자료를 이용했다. 모델영역에서 육상으로부터 하천을 통하여 모델영역 내에 포함되는 담수유입원은 약 200여개의 크고 작은 하천이 있으나, 실제 조사에서 평상시 건천(乾川)으로 수량이 유지되기 어렵기 때문에 모델기간의 전, 중, 후 3회에 걸쳐 유량 및 수질 조사를 실시하여 평균한 값 중에서, 상대적으로 유량이 많은 통영소재 1개의 하수종말처리장(통영시 수질환경사업소)과, 1개의 분뇨처리장(통영시 위생환경사업소)을 포함, 총 15개의 하천을 모델에서 고려하고, 나머지에 대해서는 무시하였다.

해저마찰계수(Chezy계수)는 식 (3.1)에 의해 계산 할 수 있는데, 여기서는 심해의 최적치로서 일반적으로 해의 안정성을 주는 R=0.0025를 적용하였으며, 수평확산계수는 일본의 경우 대부분 내만에서 $10^3 \sim 10^6$단위의 범위로 측정되고 있는데(宇野木, 1974; 中村 等, 1989; 上嶋 等, 1982), 우리나라의 경우는 본 모델을 이용해서 최(1992)가 진해만에서 3.0×10^5 ㎠/sec를 적용하였고, 김(1995)이 황해에서 1.0×10^7 ㎠/sec, 그리고 조(1996)가 가막만에서 1.0×10^5 ㎠/sec를 적용하였으며, 이(2000)은 낙동강 하구해역에서 층별로 $1.0\times 10^4 \sim 1.0\times 10^4$ ㎠/sec을 적용하였으며, 이(2001)은 고성만에서 3.0×10^4㎠/sec을 적용한 바 있다. 본 연구에서는 외양으로 개방적인 해역의 특성과 유속이 빠르고, 수심이 얕기 때문에 층별로 큰 차이가 없다고 가정하고, 전층에서는 1.0×10^5㎠/sec적용하였다.

$$C=\frac{1}{n}h^{\frac{1}{6}} \tag{3.1}$$

계산시간 간격(time step)은 식 (3.2)에 나타낸, Courant-Friedrich-Lewy의 안정조건을 고려하여 결정하였다.

$$\frac{\Delta t}{2} \le \frac{\alpha \Delta s}{\sqrt{g h_{\max}}} \tag{3.2}$$

확산(diffusion)은 물질 순환 및 분포특성의 파악을 위해 중요하게 다루어지며, 확

산의 계산에서는 수송과 난류적 확산의 과정이 해수유동모델을 통해 계산하게 되는데, 난류확산의 분산은 실제로는 시간에 선형적인 관계가 아니라서, 계산 하고자 하는 시간규모에 맞도록 고려하여야 하기 때문에, 난류적 유동은 직접 계산이 어려우므로, 확산의 고려에서는 와동확산계수를 도입하여 문제해결을 시도하여야 한다(Lee, 1997).

연직·수평확산계수는 전 층에서 0.1㎠/sec를 적용하였다. 또한 Coriolis coefficient가 위도에 따라서 일정한 f-plane을 이용하였고, 바람의 영향은 시·공간적으로 불규칙하나, 무풍으로 가정하였고, 먼바다로부터의 해류와 같은 물리 적인 외력은 무시하였다.

Table 3.1. Input data for a hydrodynamic model

Parameters	Input values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 500m$
Total mesh value	83×67×3 = 5561×3
Water depth	chart datum + MSL
Time interval	9sec
Level	Level 1 : 0~5m
	Level 2 : 5~15m
	Level 3 : below 15m
Water Temp. and Sal. at open boundary	Level 1 : 26.4℃, 30.6
	Level 2 : 26.2℃, 30.4
	Level 3 : 24.4℃, 31.4
Coriolis coefficient	$f = 2w\sin\phi$
Surface/Internal friction coefficient	0.0013 / 0.0013
Bottom friction coefficient	0.0025
Horizontal viscosity coefficient	1.0E6(cm^2/s)
Horizontal diffusion coefficient	1.0E5(cm^2/s)
Vertical diffusion coefficient	Level 1~3 : 0.1(cm^2/s)
Calculation time	10 tidal cycles

3.2.3 시간변동에 따른 유동장의 재현과 검증

3차원 해수유동모델의 목적은 유해적조발생을 재현하기 위한 생태계 모델의 이류확산계산에 이용되기 때문에 재현하고자 하는 생태계 인자의 시간변동을 계산 할 수 있어야 한다. 그러나, 경계의 값에 대한 nodal correction effect의 고려를 하지 못하는 등 지금까지 사용되어 왔던 잔차류를 이용한 생태계 모델의 계산으로는 생태계의 시간변동을 예측하기는 어렵다(박, 2001; 이, 2001; 이, 2000; 김, 1999; 김, 1995; 김, 1994). 따라서, 유동모델은 Real-time simulation(정, 1997; 이, 1996)이어야 하거나, 적어도 시간에 따른 계산(time dependent calculation)이 가능하여야 한다.

특히, 연안역의 조류모델에서 조석의 특징은 외해 경계조건(open boundary condition)의 지정에 따라 결정된다. 외해의 경계조건은 통상 조석에 의한 해수면 변동에 의해 지정되고, 수치모델에서는 지정된 분조의 변동에 따른 조류 및 조위의 변동을 계산하게 된다(이, 1996). 따라서, 수치모델로부터 직접 실시간 조류를 계산하거나, 수치모델로부터 각 분조의 변동을 조화분해를 통해 구해낸 조화상수로부터 실시간 천문 변수를 이용하여, 예측된 조류값을 입력하는 방법이 있다(Foreman, 1978).

여기서는 IOS tidal code(Foreman, 1996)에 장주기간(1개월~6개월)의 조류관측자료를 통하여 얻어진 조화상수자료(해양수산부, 1997)를 이용하여 해양 경계의 전 정점에서 조위를 예측하고, 이를 외부파일로 작성하여 조석류를 계산하여 유동이 해당시간에 대입이 되도록 하였다(Patrick et al.,2001; John et al., 2000; Foreman, 2000).

특정지점에서의 조위 h(t)의 예측은,

$$h(t) = \sum_{j}^{m} f_j(t) A_j \cos(2\pi(V_j(t) + u_j(t) - g_j)) \tag{3.3}$$

여기서, A_j, g_j = j 성분의 amplitude와 phase lag

$f_j(t), u_j(t)$ = j 성분에 대한 amplitude와 phase nodal mudulation correction factor

$V(t)$ = j 성분에 대한 astronomical argument

유동모델은 생태계 모델이 조석류와 유동이 정상상태에 도달하도록 초기치를 입력하여 조석계산을 수행하고, 해가 안정된 이후의 시간에 다시 초기치를 입력하여 계산한 값을 저장하여 출력하였다. 그 결과가 관측치와 어느 정도 일치하는지 알아보기 위해서 전체적인 유향과 유속을(해양수산부, 1998) 시뮬레이션 된 조류도와 상호비교

하여 유동모델을 검증하였다. 또한, Time-dependent 계산을 위한 조석류의 계산결과는 통영 검조소(A in Fig. 3.2; 32.825N-128.437E)의 해당시간 조위 관측 결과와 이 지점에서의 조위 예측 결과를 출력, 비교하여 검증하였다. Table 3.2에는 사용된 조화상수를 나타내었는데, 외해경계조건은 경계의 양 끝단의 값으로 선형보간하여 사용하였다.

Table 3.2. Tidal level and degree at open boundary

	O1		K1		M2		S2	
	cm	°	cm	°	cm	°	cm	°
BD1	0.11	150.9	0.16	172.4	0.85	253.7	0.41	274.1
BD2	0.12	153.0	0.17	169.0	0.94	250.0	0.42	272.0
BD3	0.11	152.6	0.16	169.7	0.87	251.5	0.39	284.7
BD4	0.10	152.0	0.16	173.2	0.82	247.3	0.39	280.8
BD5	0.11	151.7	0.17	169.5	0.89	247.6	0.41	281.9
BD6	0.10	149.4	0.15	172.6	0.80	248.4	0.37	275.9

Table 3.3. The estimation of discharge and pollutant loads from the river and wastewater treatment plant effluent over the TongYeong area

St.	Flow R.	NH_4^+-N	NO_2^--N	NO_3^--N	PO_4^{3-}-P	COD	POC	DOC
	m^3/day	μM	μM	μM	μM	mg/L	mgC/m^3	mgC/m^3
DA	43	5.28 ~28.85	0.85 ~3.93	16.99 ~28.17	0.002 ~0.009	0.90 ~1.81	423.9 ~836.8	3823.8 ~7038.6
YM	14	1.92 ~39.10	0.89 ~7.66	15.21 ~39.49	0.004 ~0.010	0.80 ~2.11	266.0 ~602.1	4850.5 ~6935.3
JH	1800	2.10 ~157.36	0.83 ~10.66	18.43 ~29.75	0.002 ~0.026	2.31 ~5.83	319.0 ~633.6	4372.8 ~6332.7
SY	7704	0.46 ~27.94	0.89 ~1.51	11.67 ~19.96	0.001 ~0.010	0.74 ~1.54	282.5 ~1385.1	3958.1 ~6330.5
TYA	37000	13.78 ~13.78	1.90 ~1.90	23.85 ~23.85	1.540 ~1.540	23.75 ~23.75	3743.2 ~3743.2	11229.7 ~11229.7
TYB	230	13.78 ~13.78	1.90 ~1.90	23.85 ~23.85	1.540 ~1.540	23.75 ~23.75	3743.2 ~3743.2	11229.7 ~11229.7
GS	2160	31.54 ~69.94	1.65 ~2.79	5.93 ~9.69	0.002 ~0.009	0.30 ~2.51	344.2 ~1614.7	4041.4 ~6926.1
BS	294	7.64 ~30.72	0.61 ~0.90	5.77 ~13.84	0.000 ~0.006	2.14 ~3.22	220.6 ~341.4	3274.9 ~7939.3
SB	2020	1.93 ~3.09	0.41 ~0.61	22.37 ~48.66	0.000 ~0.002	1.98~3.3 8	236.3 ~1325.7	2759.6 ~3865.1
HL	11650	1.56 ~1.85	0.58 ~1.04	25.16 ~67.48	0.000 ~0.004	4.56 ~8.14	217.6 ~1104.9	2798.2 ~4001.3
OB	847	0.47 ~0.96	0.54 ~0.64	8.46 ~22.38	0.000 ~0.007	2.24 ~3.35	280.7 ~569.0	2991.3 ~3756.7
SCP	54354	8.63 ~119.72	1.68 ~5.40	13.08 ~44.17	0.003 ~0.014	1.64 ~2.11	360.3 ~1015.0	3542.4 ~7721.4
HC	16128	9.52 ~18.82	1.98 ~5.74	7.15 ~24.11	0.002 ~0.006	0.87 ~1.24	235.3 ~703.9	3928.0 ~14670.0
KH	65664	0.81 ~23.83	1.91 ~12.74	68.36 ~75.27	0.000 ~0.003	0.77 ~1.64	298.8 ~536.9	3818.8 ~4561.3
YS	4752	64.27 ~119.51	2.73 ~12.93	6.48 ~16.90	0.005 ~0.020	1.04 ~1.81	204.0 ~821.3	5180.0 ~6974.4

3.3 생태계모델의 시뮬레이션

3.3.1 생태계모델의 입력자료

1) 모델영역

생태계모델의 모델영역은 해수유동모델에 사용된 모델 격자망과 동일하게 적용하였다.

2) 입력자료

(1) 초기치 및 경계치

Table 3.4에는 생태계모델에 사용된 물질의 수평 및 연직확산계수는 유동모델에 적용된 동일한 계수값을 사용하였다. 경계치는 Table 3.5에 나타낸 바와 같이 대상해역의 실측치를 토대로 공간적인 분포를 고려하여 입력하였다. 경계치는 현장관측 데이터(Appendix 16~18)에 나타내었다.

Table 3.4. Input data for an ecosystem model

Parameters	Input values
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 500m$
Water depth	chart datum + MSL
Time interval	3600sec
Pollutant loads	Refer to Table 3.3
Horizontal viscosity coefficient	$1.0E6(cm^2/s)$
Horizontal diffusion coefficient	$1.0E5(cm^2/s)$
Vertical diffusion coefficient	Level 1~3 : $0.1(cm^2/s)$
Calculation time	16 tidal cycles
Water Temp. and Sal.	Level 1 : 22.47~25.46℃, 3.38~34.02
	Level 2 : 17.22~22.47℃, 28.42~34.11
	Level 3 : 13.60~19.91℃, 29.97~34.45

(2) 퇴적물 영양염용출량

대상해역내의 퇴적물에 의한 영양염 용출량은 김(1994)의 자료에서는 암모니아는 14.87~36.37㎎/㎡/day, 인산인은 7.04~9.90㎎/㎡/day의 값을 사용하였는데, 본 연구

에서는 암모니아가 3.66㎎/㎡/day(김, 1996), 인산인이 0.28㎎/㎡/day의 값을 적용하였다.

(3) 육상 유입부하량

모델영역 내로 유입되는 육상 부하원은 총 15개로 고려하였다. 생태계모델의 구성요소에 대한 부하량은 Table 3.5에 나타낸 바와 같이 농도에 관측된 유량의 평균을 곱하여 계산하였고, 대기로부터의 유입부하 등 비점오염부하는 고려하지 않았다.

Table 3.5. The pollutant loads from rivers flowing into the model region

St.	Pollutant loads						
	NH_4^+-N	NO_2^--N	NO_3^--N	PO_4^{3-}-P	COD	POC	DOC
	kg/day						
DA	1.205E-02	1.319E-03	1.332E-02	7.114E-06	7.799E-04	4.110E-01	7.477E+00
YM	3.834E-03	7.812E-04	4.655E-03	2.763E-06	3.218E-04	7.637E-02	2.448E+00
JH	1.616E+00	1.582E-01	6.073E-01	6.011E-04	1.072E-01	1.188E+01	2.929E+02
SY	1.053E+00	1.222E-01	1.829E+00	1.146E-03	1.217E-01	8.110E+01	1.135E+03
TYA	7.139E+00	9.860E-01	1.235E+01	1.766E+00	1.230E+01	1.939E+03	1.288E+04
TYB	4.438E-02	6.129E-03	7.679E-02	1.098E-02	7.648E-02	1.205E+01	8.007E+01
GS	1.408E+00	7.250E-02	2.307E-01	3.285E-04	5.066E-02	2.513E+01	3.828E+02
BS	8.016E-02	3.234E-03	3.888E-02	3.584E-05	1.071E-02	1.226E+00	4.648E+01
SB	7.057E-02	1.535E-02	9.006E-01	6.733E-05	7.422E-02	1.778E+01	2.076E+02
HL	2.784E-01	1.247E-01	6.754E+00	5.289E-04	1.120E+00	8.873E+01	1.269E+03
OB	9.101E-03	7.002E-03	1.750E-01	1.036E-04	3.443E-02	4.947E+00	9.158E+01
SCP	5.487E+01	3.053E+00	1.825E+01	1.678E-02	1.411E+00	5.272E+02	1.025E+04
HC	3.495E+00	8.139E-01	3.416E+00	2.015E-03	2.370E-01	1.109E+02	4.250E+03
KH	1.037E+01	5.555E+00	6.503E+01	3.329E-03	1.181E+00	3.499E+02	8.457E+03
YS	6.092E+00	4.657E-01	8.540E-01	1.988E-03	8.767E-02	3.318E+01	8.859E+02

(4) 생물학적 파라메타

Table 3.7와 같이 확산계수 및 그 밖의 모델에 입력되는 파라메타는 기존의 측정된 자료와 문헌조사를 통하여 적절하게 선정하였는데, 생태계 모델의 각종 입력자료나 계수값은 근본적으로 전체가 현장의 값을 실측하는 것이 원칙이지만, 현장의 해수

관측값을 제외한 모델 입력계수값은 문헌값을 사용하였다. 본 연구에 적용된 각종 동식물 플랑크톤과 다른 생물학적 파라메타들은 기본적으로 Jørgensen등(1991)과 George등(1987)의 연구를 참고 한 것으로, 식물플랑크톤의 자료는 국내 배양결과를 나머지는 본 모델로 적용한 연구결과(Taguchi, 2000; Nakata, 2000; Taguchi, 1998)의 자료를 활용하였다.

식물플랑크톤 최대성장속도, 동물플랑크톤 섭취속도, 인산인과 용존무기질소에 대한 반포화정수값은 대상해역의 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 우점종 조성을 고려해서 공간적으로 차이가 나게 입력하였는데, 특히 적조발생시 우점하는 *Chochlodinium Polykricoides*의 값(김, 1998; 안, 1997; 심, 1999)을 인용하였다.

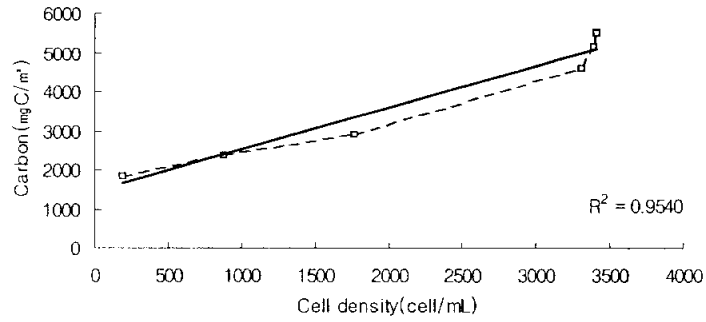
식물플랑크톤 성장속도의 온도 의존성을 지수함수로 표현한 대부분의 모델들은 20℃를 기준으로 하고 있으나, Eppley(1972)와 Thomann et al.(1975)은 0℃를 기준으로 하고 있다. Eppley(1972)는 다양한 종에 관한 많은 연구 결과로부터 0℃의 최대성장속도는 0.59/day이라 했는데, 20℃로 환산할 경우 2.09/day가 된다. 한편 Beca and Arnett(1976)는 20℃에서 0.2~8.0/day범위를 제시하였다. 본 모델에서는 최대성장속도를 공간적으로 0.3~1.4/day범위에서 적용하였다.

식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 사멸속도는 본 모델에서 온도의 함수로 취급하였으나, 불명확한 점이 많고 일반적으로 상수로 취급하고 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 0.015/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. 동물플랑크톤의 탄소함량은 실측치가 없는 관계로 김(1994)의 자료를 이용하였다. 입자 유기물의 분해속도는 20℃를 기준으로 Yoshida(1983)는 0.19~0.38/day범위, 宋 等(1991)은 0.20~0.23/day범위로 제시하였다. 본 모델에서는 분해속도를 $k=\alpha_5 \cdot \exp(\beta_5 \cdot T)$와 같이 온도 의존성으로 표현하고 있으므로 0℃에서 최대분해속도 α5와 온도계수 β5는 Ishilkawa와 Nishimura(1983)가 大阪灣에서 관측한 자료를 이용하여 산정하였다. 봄철(15℃)에 大阪灣에서 관측된 평균분해 속도는 평균 0.21/day였고, 여름철(25℃)에는 평

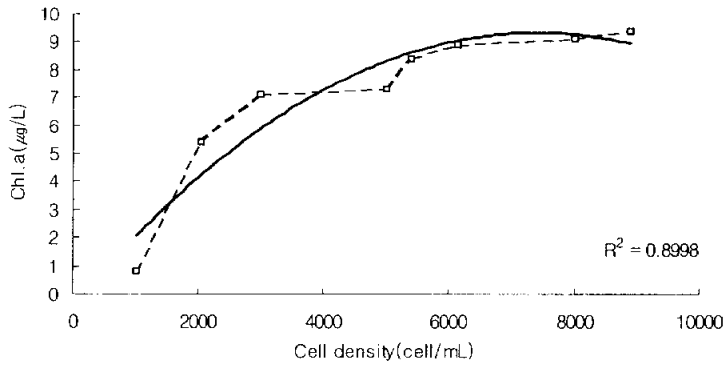
균 0.27/day였으므로 α_5값을 0.15/day로 입력하였다. 그리고 Bansal(1975)은 CBOD의 분해속도를 0.02~3.37/day범위로 광범위하게 제시하고 있으므로 여기서는 0.085/day를 입력값으로 하였다. 용존 유기물(DOC)의 분해속도는 온도와 용존산소 농도의 함수로 표현된다. 해수 중 DOC의 분해속도는 0.0017~0.25/day범위로 변화폭이 넓으므로 여기서는 0.002/day를 입력값으로 하였다.

Chlorophyll a(Chl. a ㎎/㎥)와 식물플랑크톤의 탄소량(㎎C/㎥)에 대한 환산계수는 많은 연구자에 의해서 조사되었는데, 이 계수값은 계절별로 차이가 있다고 보고되고 있다. 그러나, 탄소수지로 계산이 수행되는 생태계 모델에서는 단위세포에 대한 클로로필과 탄소의 관계를 명확히 하는 것이 중요하다. C/Chl. a 비율을 변화시키는 요인은 빛의 세기, 영양염의 농도, 종조성 및 식물플랑크톤의 크기에 따라 차이가 나는데, 빛의 세기가 작은 상황에서는 클로로필의 함량이 증가하며(Epply et al., 1973; Fee, 1976), 식물플랑크톤의 세포에서 Chlorophyll a 농도와 빛의 세기와는 역상관성이 있다고 하였다(Brown & Richardson, 1968). 따라서 광이 성장제한 요인이면 C/Chl. a 비율은 감소한다(Laws & Bannister, 1980; Hunter & Laws, 1981). 또한 영양염의 종류와 상관없이 영양염이 결핍될 때 C/Chl. a 비율이 증가하는데, 이는 세포내의 탄소량 증가와 Chl.a의 감소때문이다(Thomas and Dodson, 1972; Perry, 1976). C/Chl. a 비율은 식물플랑크톤의 크기가 커질수록 증가하는 경향을 가진다(Takahashi and Bienfang, 1983). 본 모델에서는 심 등(1989)이 천수만을 대상으로 조사한 C/Chl. a 비에서 하계 6월의 평균 측정값인 표층의 경우는 31, 중층은 27, 저층은 25를 기본적으로 적용하고 있는데(김, 1994; 이, 1999), Fig. 4.9(Appendix 19)에서는 배양실험을 통해 얻어진 *Cochlodinium polykrikoides*의 개체당 클로로필 농도와 탄소량을 나타내었다. C/Chl.a의 값은 약 1000~2000정도의 값으로, 기존에 사용하던 30부근의 값과도 차이가 있다는 것을 알 수 있다. Roelke(1999, 2000)는 cell quota action을 하는 종(pulsing growth)은 먼저 성장한 군집의 저해 작용으로 인하여, 그렇지 못한 종(slow growth)의 성장을 제한한다고 밝혔다. 또한, Rouzic(1997)은 Droop식을 통하여, 고농도의 영양염에서는 오히려 성장이 제한되는 군집의 성장에 대하여 설명하였다. 배양조건이 아닌 현장환경을 고려하는 모델의 경우에 $QP = SQP + QP_0, QN = SQN + QN_0$로 표현이 가능한데, 여기서, 세포내의 전체 영양염에서 세포기질을 구성하는 영양염을 뺀

부분(SQP, SQN)은 비율로써 각각 5~7, 10~12(Roelke, 1999)의 값 등을 적용할 수가 있는데, 본 연구에서는 이 값의 최대치를 8, 16의 값으로 적용하였다.



(a)



(b)

Fig. 3.3. Relationship among the Chl.a, Carbon and Cell density of *Cochlodinium polykrikoides*.

3.3.2 생태계모델의 안정성과 보정

생태계모델의 해의 안정성을 확인하기 위해서 대상해역의 몇 개의 지점에서 구성요소에 대한 계산시간별 변동을 비교하여, 실측값과 맞도록 생태계모델의 각종 계수값을 조절해가며 Calibration하였으며, bloom 발생에 가장 크게 기여하는 인자를 도출하는데 이용하였다.

3.3.3 적조발생의 재현

식물플랑크톤의 우점종을 고려해서 그 종에 적절한 각종 파라메타를 입력하여 Table 3.6을 참고로 해서 시간변동에 따른 식물플랑크톤 극대역의 변동을 시뮬레이션 하였다. 또한, 표층 식물플랑크톤의 분포에 대한 물리과정의 기여율(분산, 안정, 집적)에 대하여 시간에 따라 출력하여 적조발생의 공간적인 확산과 집적에 대해 고찰하였다.

Table 3.6. Input data of biological parameters used in an ecosystem model

Parameters	Values	Remarks
Phytoplankton		
Maximum growth rate	0.59exp(0.0633T)	Jorgensen('79)
Maximum nutrient uptake rates	Phosphorus 0.4, Nitrogen 0.31	Kim('99)
Half saturation constants for nutrient uptake	Phosphate 0.57, Ammonium, 2.10 Nitrate, 1.03	Kim('99), Shim('98)
Ammonium inhibition factor for nitrate uptake	0.5	Fumio('00)
Maximum capacity of cell quota	Phosphorus 16, Nitrogen 8	Fumio('00)
Maximum surface radiation	800	Fumio('00)
Daytime length	0.57	Fumio('00)
Photosynthetic light optimum	150	Ryther('56)
Light extinction coefficient	0.80+0.007 Chl-a	Fumio('00)
Fraction of extracellular release	0.67exp(-0.002 Chl-a)	Kang('04)
Respiration rate	0.03 exp(0.0524T)	Fumio('00)
Sinking rate of living cells	0.2	Fumio('00)
Rate of natural mortality	2×10^{-4}exp(0.0693T)	Fumio('00)
C/Chl-a ratio	2784.44	Shim('98)
C/P, C/N ratios	149.0, 5.5	Nakamura('92)
O/C ratio	3.41	Fumio('00)
COD/C ratio	1.38	Fumio('00)

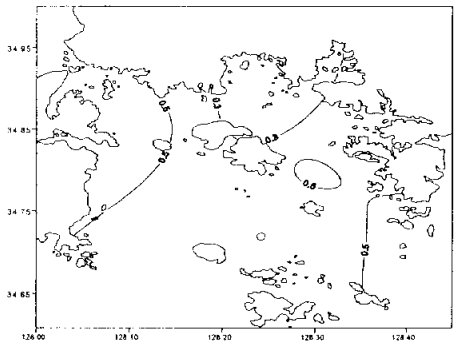
Table 3.6. Input data of biological parameters used in an ecosystem model (continued)

Parameters	Values	Remarks
Zooplankton		
Maximum ration	0.18exp(0.0693T)	
Ivlev's constant	0.01	Lee('00)
Feeding threshold	0.0	Lee('00)
Rate of basic metabolism	0.0214 exp(0.0637T)	Fumio('00)
Energy expenditure in grazing activity	30% of the daily carbon ration	Ikeda & Motoda('73)
Assimilation efficiency	70.0	Ikeda & Motoda('73)
Rate of natural mortality	3×10^{-3}exp(0.0693T)	Ogura('72)
C/P, *C/N* ratios	35.3, 5.4	
O/C ratio	3.03	
COD/*C* ratio	1.34	
Detrital carbon		
Mineralization rate	0.007exp(0.0693T)	
Oxygen limitation	0.5	
Fraction of biodegradation	12.5% of mineralization	
C/P, *C/N* ratios	63.9, 7.2	
O/C ratio	3.30	
COD/*C* ratio	1.33	
Sinking rate	0.5	
Dissolved organic carbon		
Mineralization rate	0.002exp(0.0693T)	
Oxygen limitation	0.5	
C/P, *C/N* ratio	125, 10	
O/C ratio	3.12	
COD/C ratio	1.25	
Others		
Nitrification rate of ammonium	0.01exp(0.0693T)	
Oxygen limitation	0.5	
Nitrification rate of nitrite	0.03exp(0.0693T)	
Oxygen limitation	0.5	
Aeration rate	0.5	

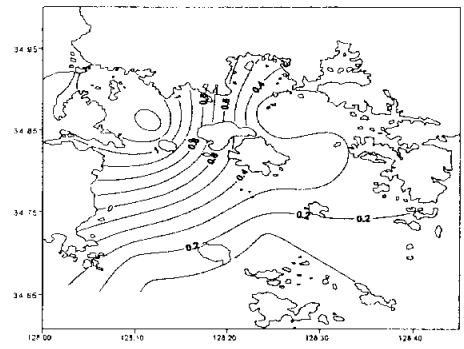
Ⅳ. 결과 및 고찰

4.1 현장관측 결과

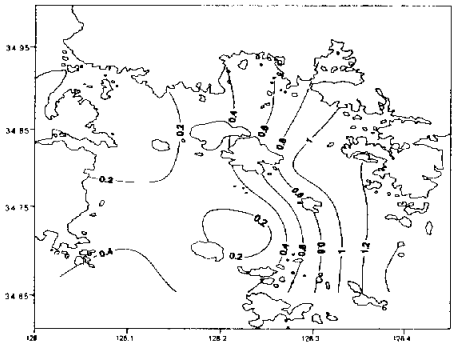
현장관측 결과는 Appendix 1~15에 걸쳐 수질과 식물플랑크톤의 동정결과를 나타내었으며, 이 자료들을 바탕으로 Fig. 4.1의 2002년 7월 29~8월 28일까지 전 조사 정점에서 측정한 Chlorophyll a의 농도를 나타내었다.



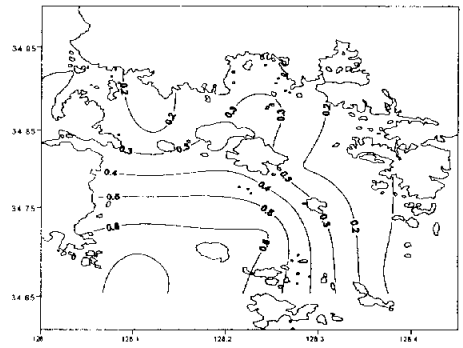
(a) Surface chl. a 29 Jul.



(b) Surface chl. a 31 Jul.

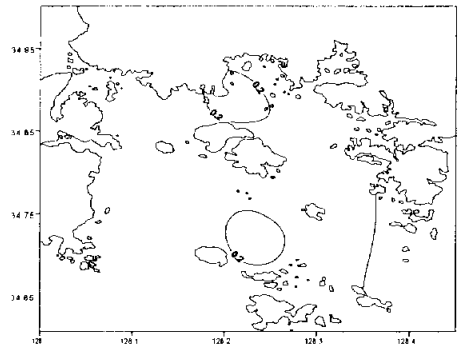


(c) Surface chl. a 2 Aug.

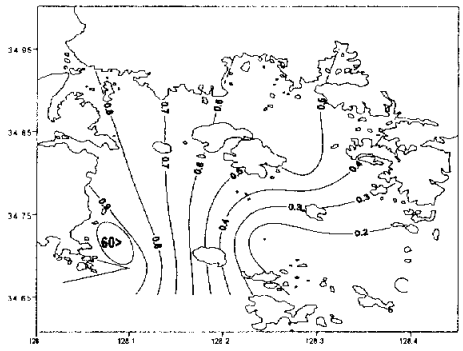


(d) Surface chl. a 3 Aug.

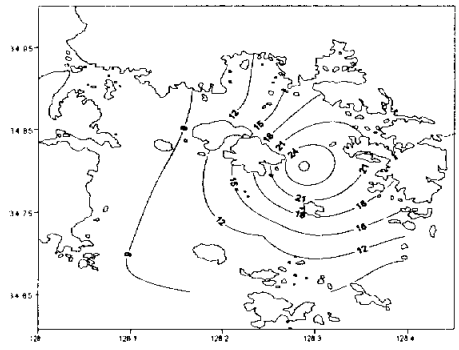
Fig. 4.1. Concentration of Chlorophyll a(μg/L) during 29 Jul. ~28 Aug., 2002 in Tongyeong Sea.



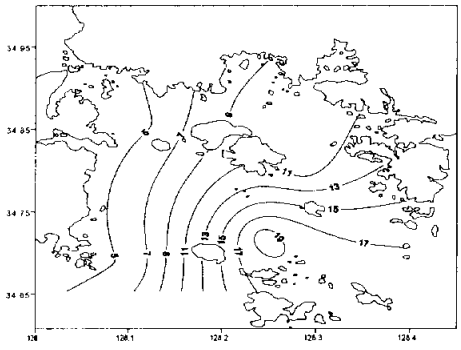
(e) Surface chl. a 4 Aug.



(f) Surface chl. a 5 Aug.



(g) Surface chl. a 14 Aug.



(h) Surface chl. a 28 Aug.

Fig. 4.1. Concentration of Chlorophyll a(μg/L) during 29 Jul. ~28 Aug., 2002 in Tongyeong Sea(continued).

식물플랑크톤의 농도를 나타내는 Chl. a의 농도의 변동을 살펴보면, 전 정점에서 낮은 농도 분포를 보이다가, *Cochlodinium polykrikoides*가 8월 5일 남해 마안도 연안에서 거대한 bloom을 일으킨 이후부터, 집중강우로 인하여 육상으로부터의 물질 유입이 대량으로 이루어진 8월 말 이후까지 높은 농도를 유지하고 있다. 실제 2002년의 *Cochlodinium* 적조는 7월 말 외나로도에서 발생하여, 8월 3일경에 통영마안도 앞바다에서 발생하였는데, 특히 8월 5일부터 본격적인 bloom이 발생하였다. Table 4.1에는 Appendix 10~15까지의 자료를 바탕으로 현장 식물플랑크톤의 우점율의 변동을 나타내었는데, 8월 3일부터 전 정점에 걸쳐서 *Cochlodinium polykrikoides*의 우점율이 높아

지는 것을 관찰할 수있다.

Table 4.1. The dominent species of phytoplankton in the coastal waters of TongYeong from July to Sep. in 2002

Date	Dominent species	Dominance ratio(%)
2. Jul.	*Chaetocerose* spp.	41.18~87.18
	Skeletonema costatum	10.05~23.53
29 Jul.	*Chaetocerose* spp.	20.69~70.49
	Skeletonema costatum	24.36~43.65
31 Jul.	*Chaetocerose* spp.	0~82.67
	Coscinodiscus spp.	0~31.63
	Skeletonema costatum	0~53.97
	Thalassionema nitzchioids	0~33.33
2 Aug.	*Chaetocerose* spp.	13.95~85.71
	Navicula spp.	0~22.22
	Skeletonema costatum	0~62.79
3 Aug.	*Chaetocerose* spp.	0~81.33
	Coscinodiscus spp.	0~60
	Leptocylindrus spp.	0~22.22
	Skeletonema costatum	0~24.48
	Cochlodinium polykrikoides	0~72.73
4 Aug.	*Chaetocerose* spp.	0.64~98.29
	Skeletonema costatum	0~97.76
5 Aug.	*Chaetocerose* spp.	0~100
	Leptocylindrus spp.	0~42.86
	Skeletonema costatum	0~32.43
	Cochlodinium polykrikoides	0~100
14 Aug.	*Chaetocerose* spp.	0~33.33
	Skeletonema costatum	0.28~46.67
	Alexandrium spp.	0.19~50.00
	Cochlodinium polykrikoides	0~99.19
29 Aug.	*Chaetocerose* spp.	1.12~26.56
	Nitzchia spp.	0~32.81
	Skeletonema costatum	0~29.41
	Cochlodinium polykrikoides	0~95.19
18 Sep.	*Chaetocerose* spp.	2.37~57.30
	Nitzchia spp.	0.98~65.61
	Skeletonema costatum	0~57.89
	Cochlodinium polykrikoides	0~77.55

Fig. 4.2에는 종의 다양도를 Diversity index와 evenness index를 통해 나타내었는데, 8월 4일 이전에는 풍부한 종의 다양도를 보이다가 적조가 발생하면서, 다양도가 급격히 줄어들고 있다. 따라서, 우점도와 다양도의 정리결과, 8월 4일에서 5일 사이에 전 조사 정점에서 *Cochlodinium polykrikoides*에 의해 우점되었으며, 적조가 발생하고 있음을 알 수있다.

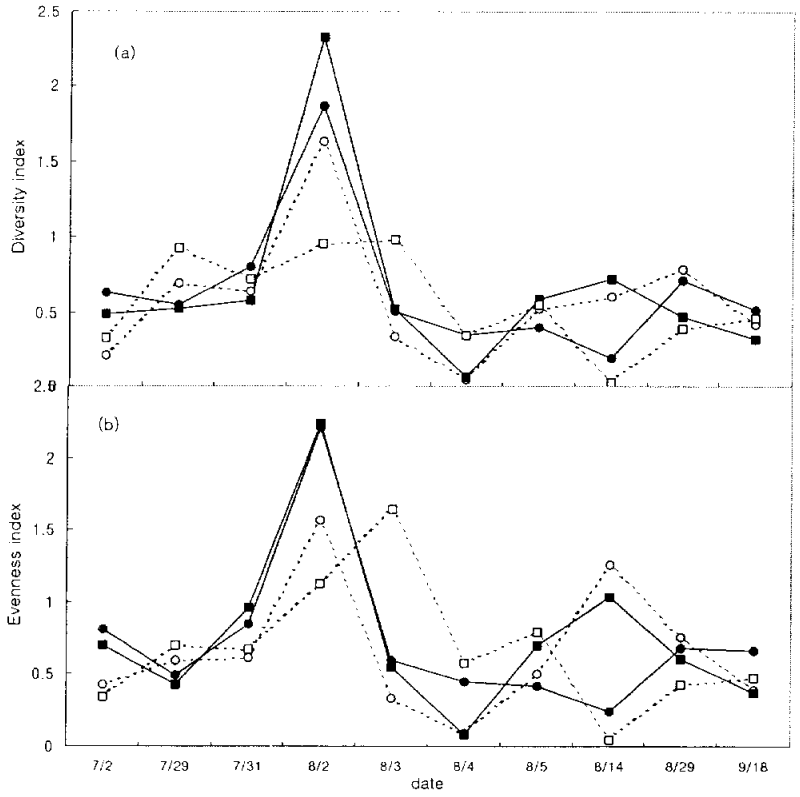


Fig. 4.2. Diversity index(a) and evenness index(b) of phytoplankton at the sampling stations(●-● : St. 1, , ○-○ : St. 2, ■-■ : St. 3, □-□ : St. 4, by Kang et al., 2003).

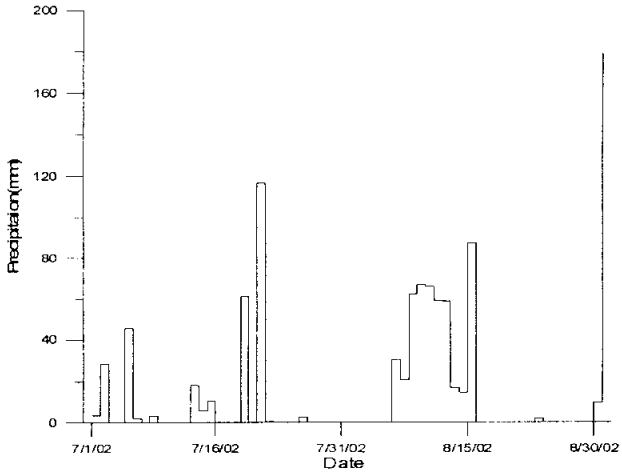
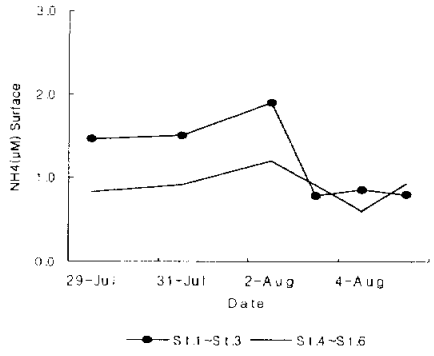


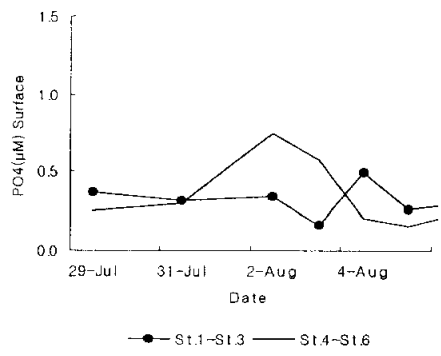
Fig. 4.3. The amount of precipitation during 1 Jul., 2002~30 Aug., 2002.

같은 기간 관측된 영양염의 변동 중에서 암모니아와 인산인의 농도변동을 Fig. 4.2에 나타내었다. 그림에서는 물리적으로나 화학적으로 특별한 구분이 없었지만, 편의상 사량도 이북의 3정점(St. 1, St.2, St.3)과 사량도 이남의 3정점(St. 4, St.5, St.6)으로 구분 하여 나타내었다. 적조발생의 가능농도(DIN : 7.14μM, DIP : 0.48μM, 日本水産資源保護協會, 1972) 보다도 질소(1.58~2.01μM)와 인산인(0.35~0.55μM)이 각각 최초에는 낮은 농도로 유지되다가 적조발생 시점 직전에서 전 층(표층, 중층, 저층)에서 급작스럽게 높아지는 것을 관측할 수 있다(DIN>6.0μM, DIP>2.0μM, Appendix 1~11). 이것은 8월 2일과 3일 사이에서 저층의 농도가 높아지면서 전체 해역의 영양염 농도가 상승하는 것을 관측할 수 있다(DIN : 0.58~6.84μM Avg.=1.83μM, DIP: 0.04~2.5μM Avg.=0.55μM).

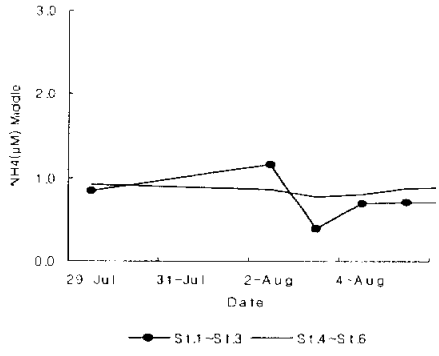
그 시점이후, 즉, 적조 발생 후에는 전 정점에서 차츰 낮아지고 있는 것을 관찰할 수 있었다. 8월 6일 이후부터 영양염 수준이 다시 상승하는 것은, 조사기간 전 1주일간은 비가 내리지 않았으나, 적조가 발생한 후부터 약 1주일동안 계속된 일 강우량 100mm이상의 넘는(Fig. 4.3) 강우에 의한 영향으로 여겨진다.



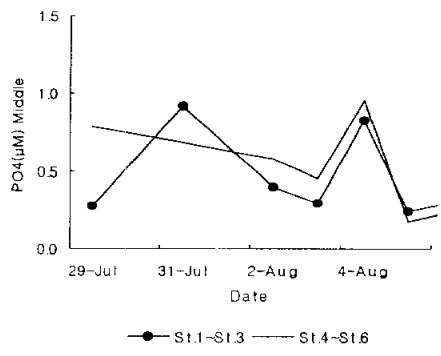
(a-1)



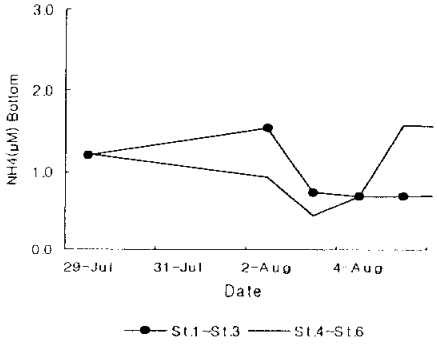
(b-1)



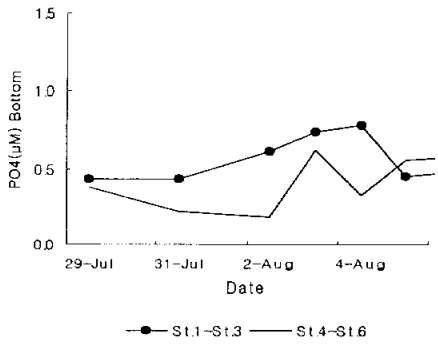
(a-2)



(b-2)



(a-3)



(b-3)

Fig. 4.4. Observed ammonia(a) and phosphate(b) concentration each level(1,2,3) during 29 Jul. ~28 Aug., 2002, in Tongyeong Sea.

4.2 해수유동장 재현의 결과

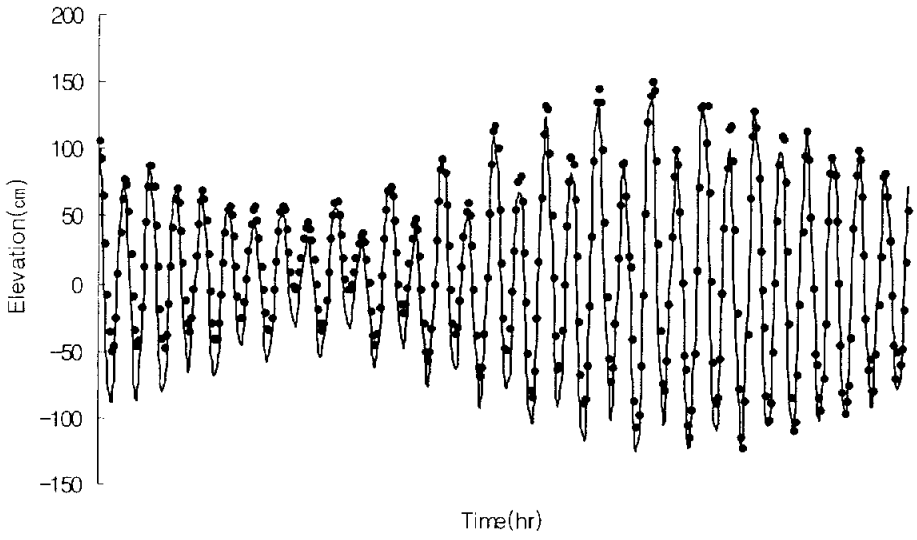


Fig. 4.5. Comparison between calculated and observed Tidal height(line: calculated elevation, dot: observed elevation).

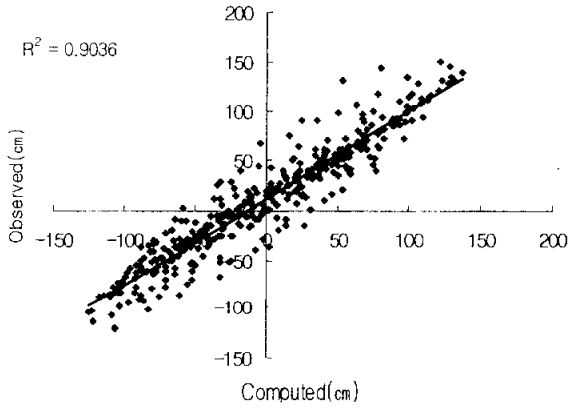
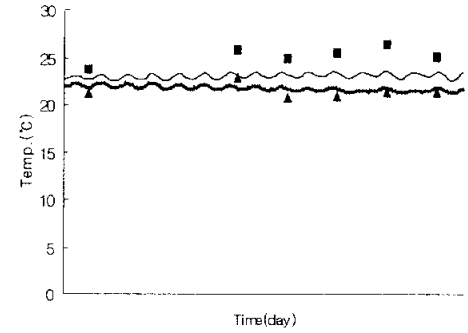
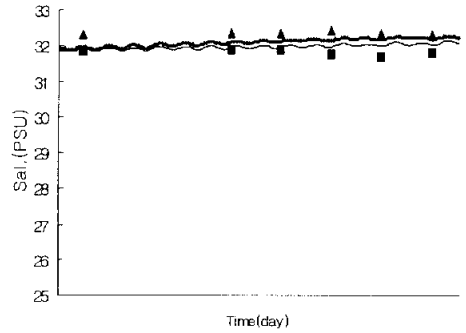


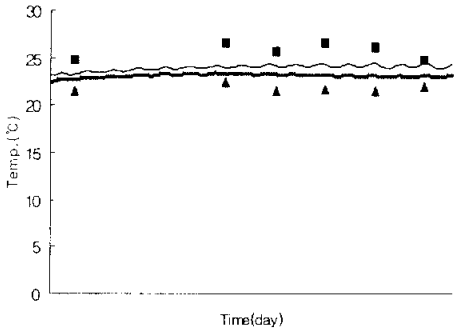
Fig. 4.6. Correlation between calculated and observed Tidal height(line: calculated elevation, dot: observed elevation).



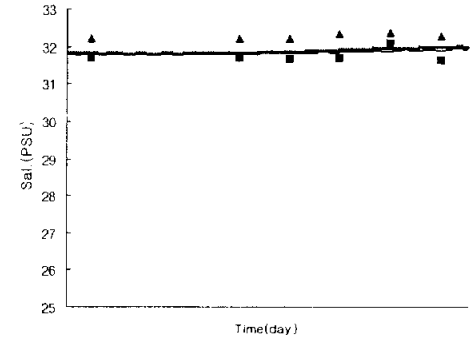
(a-1) St. 1 Temperature



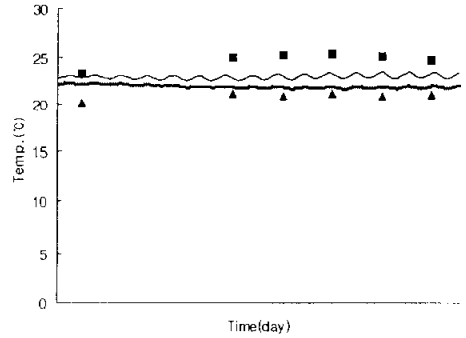
(a-2) St. 1 Salinity



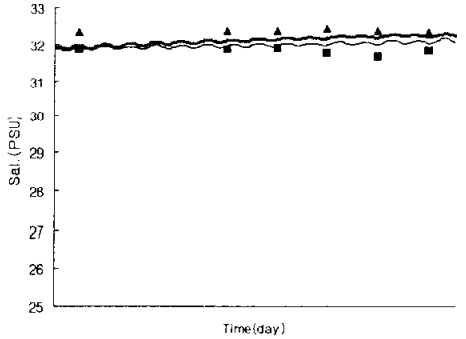
(b-1) St. 2 Temperature



(b-2) St. 2 Salinity

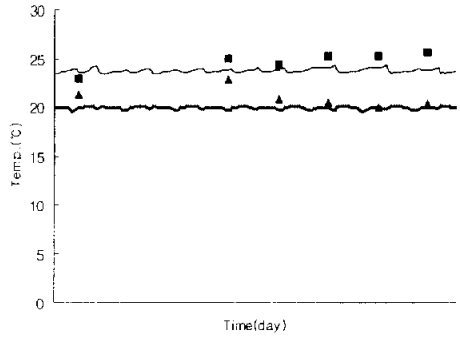


(c-1) St. 3 Temperature

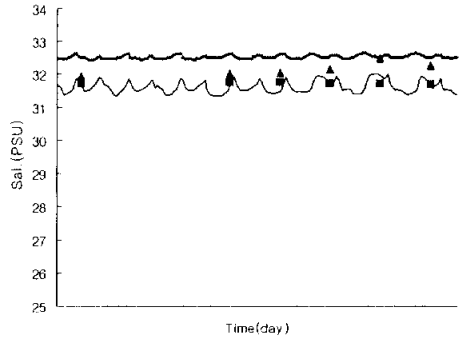


(c-2) St. 3 Salinity

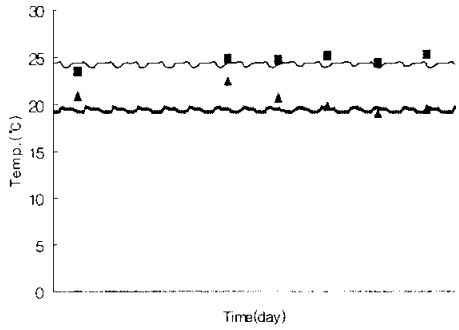
Fig. 4.7. Comparison between calculated/ observed temperature and salinity (Rect./Triang. : Surface/Bottom, solid line/ Dotted line : Surface/Bottom).



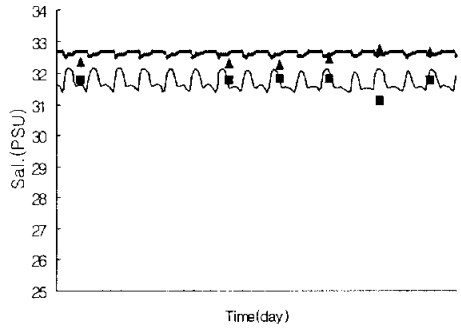
(d-1) St. 4 Temperature



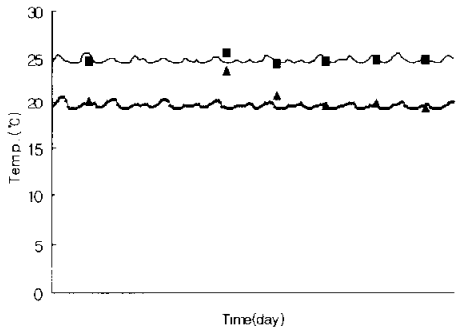
(d-2) St. 4 Salinity



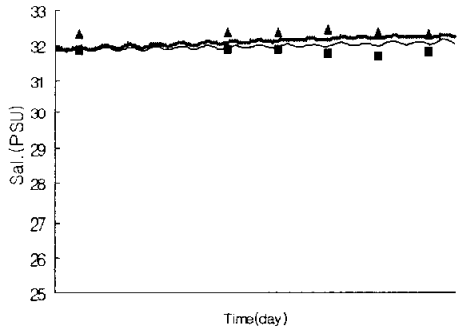
(e-1) St. 5 Temperature



(e-2) St. 5 Salinity



(f-1) St. 6 Temperature



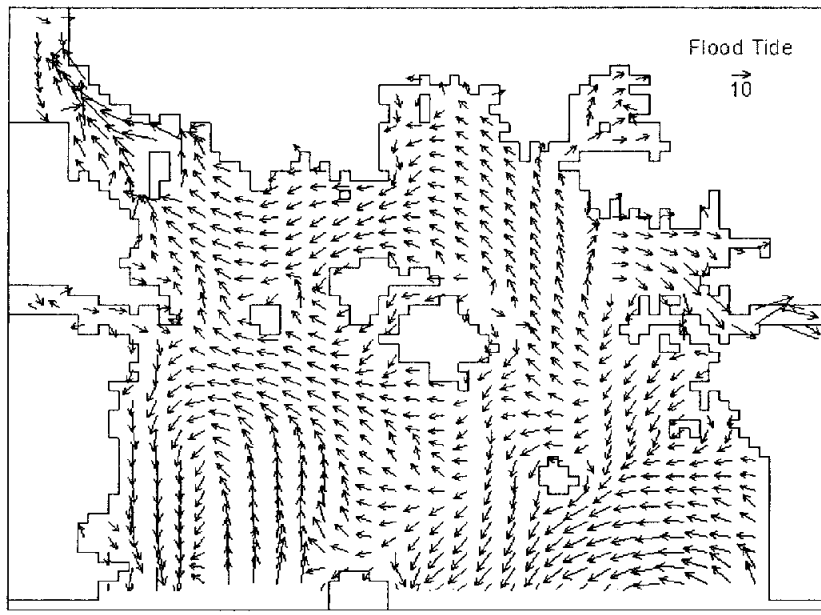
(f-2) St. 6 Salinity

Fig. 4.7. Comparison between calculated/ observed temperature and salinity (continued).

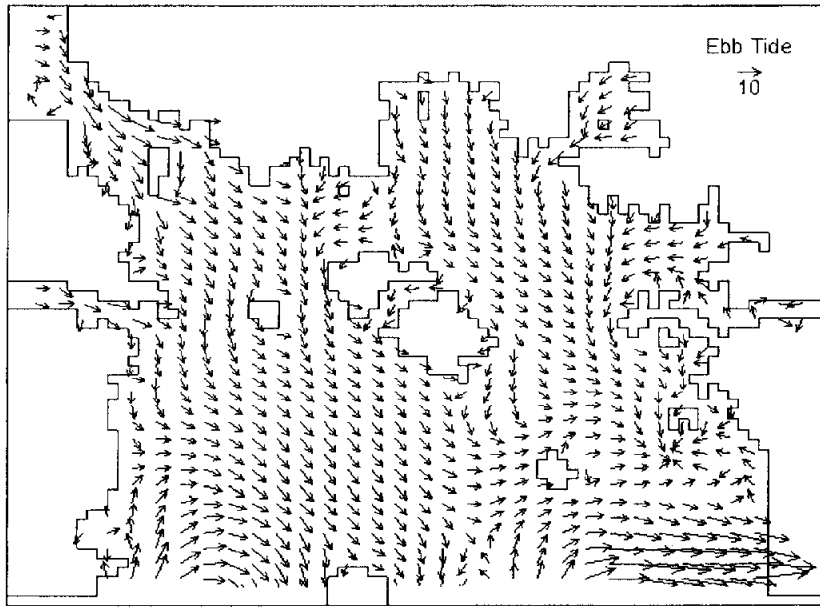
생태계 모델을 수행하기에 앞서 물리장의 재현을 위해 유체역학 모델을 수행 보정하였다. 시간에 의존(Time-dependent)하는 계산을 위해서, 생태계 모델의 확산 계산에는 평균류를 사용하지 않고 조석류를 사용하였는데, 4개분조의 합성조위를 입력하였기 때문에 각각의 조석성분을 분해하여 각각의 분조에 대해 각 지점에서의 조위 및 위상의 편차를 구하여 보정하는 방법이 필요하나 여기서는, 조석시뮬레이션의 검증과정은 Fig 4.5 및 Fig. 4.6에 나타낸 바와 같이, 관측된 조위 자료와 계산된 조위 자료를 출력하여 비교하여 경계조위를 반복 수정하는 방법으로 오차가 10%이내가 되도록 하였다. 또한, 생태계 재현에 있어서 식물플랑크톤 생장의 중요한 환경요인중의 하나인 수온과 염분에 대한 검증이 필수적으로 요구되는데, 이 과정은 6개 관측정점에 대한 수온, 염분의 계산 값을 출력하여 관측한 자료와 비교하여 경계값과 초기값을 반복 수정하는 방법으로 오차가 10%이내가 되도록 하였다. 적조의 발생에 관해서는 성층의 파괴와 저층수온의 변동의 관계(이 등, 2001; 김, 1999)가 중요한 의미를 가진다고 하는데 본 조사 기간동안에는 표저 수온차(3~5℃)의 변동은 얕은 수심에도 불구하고 작은 차이라고는 할 수 없지만, 본 모델에서는(Fig. 4.7) 저층수온의 증가 추이를 크도록 재현하기가 어려웠다.

염분은 전 정점에서 표저차이가 크게 나지 않았으나 사량도-미륵도 연안 해역쪽인 St. 4와 St. 5 부근에서 저층 염분이 보다 높게 나타났다.

Fig. 4.8에는 표층의 최강유속의 창조시와 낙조시의 해수유동을 나타내었다. 창조시에는 욕지도 동쪽을 통해 유입된 해수가 미륵도 서측을 거쳐 진주만까지 진행하고 있으며(해양수산부, 1998), 사량도 남쪽으로 유입하는 해수는 반시계방향으로 회전하여 남쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 낙조시에는 전반적으로 남서향류가 나타나는데, 남해도 남쪽을 따라 유입된 해수는 일부가 시계방향으로 회전하여 사량도의 남동방향을 통해 외해로 유출된다. 즉, 창조시에는 북서, 낙조시에는 남동향의 조류가 우세한(해양경찰청, 2001) 경향을 보인다.



(a)



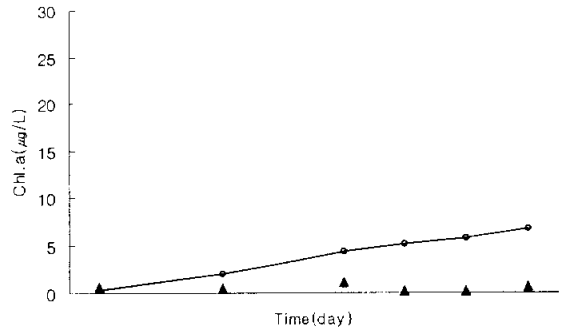
(b)

Fig. 4.8. Tidal circulation around marine ranching area surface maximum current during the flood tide(a) and ebb tide(b).

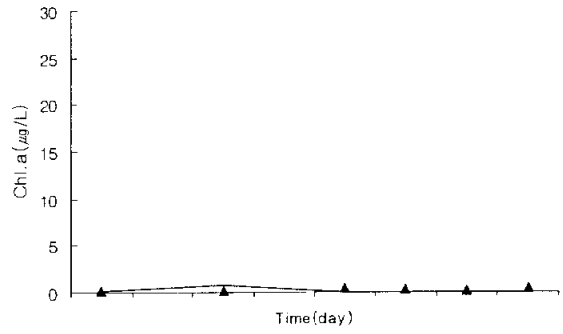
4.3 생태계모델링의 결과

Fig. 4.10에서는 6개 정점에서 관측된 클로로필농도와 계산된 생태계 모델에서의 식물플랑크톤농도와의 관계를 나타내었다. Droop 식에 의한 cell quota를 고려하는 식물플랑크톤 성장식을 이용한 생태계 모델의 적용으로, 낮은 농도(>10μg/L)에서의 변동에 관해서는(St. 1, St. 5) 재현성이 좋지 못하지만, 높은 농도의 피크 부근의 재현이 가능하였다(St. 6). 여기에 세포내 함량(SQP, SQN)의 값을 세포전체의 함량에 대한 비수량(ratio)으로 각각 12.9, 6.3의 초기값을 입력하였는데, 이 값은 환경중의 영양염농도가 감소하면 자체적으로 소모하는 것으로, 와편모조류의 일반값을 입력하였는데 본 종의 배양 실험을 통한 특정한 값이 입력될 경우 보다 근접한 결과를 얻을 수 있으리라 여겨진다.

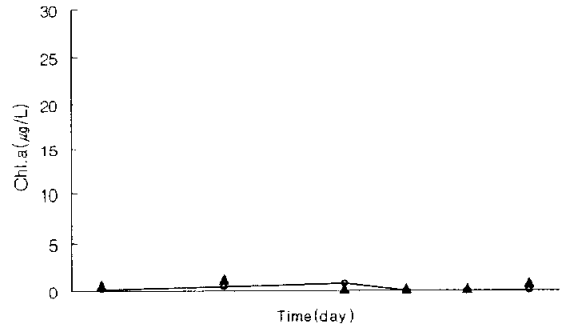
특히, Fig. 4.11에서 나타낸 바와 같이, 시간에 의존하는 계산에서 큰 적응성을 보였다. 그림에는 7월 29일부터 8월 5일까지의 식물플랑크톤 농도분포에 대한 일변화의 계산값을 나타내었는데, 계산 영역내부로 유입되는 유입부하원의 부하량은 크지 않지만, 통영-사량도 해역에 존재하는 점원 부하원인 이매패류 양식장과 가두리 양식장등의 퇴적물 부하(ola et al., 1991; Hall et al., 1992)를 고려하지 않았음에도 실제 관측되었던 blooming timing 보다 빠른 8월 2일부터 클로로필 농도로 50μg/L이상의 bloom이 남해도 동쪽의 마안도 앞 바다부터 시작되는 것을 알 수 있다.



St. 1

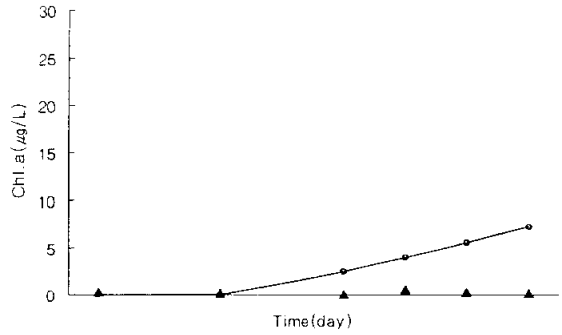


St. 2

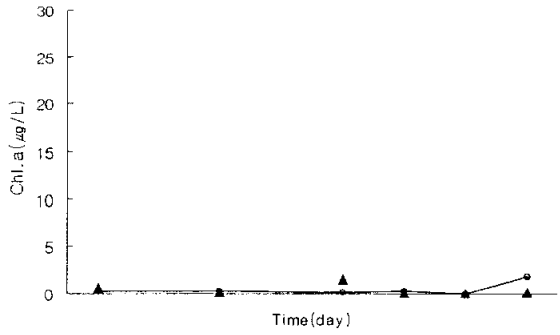


St. 3

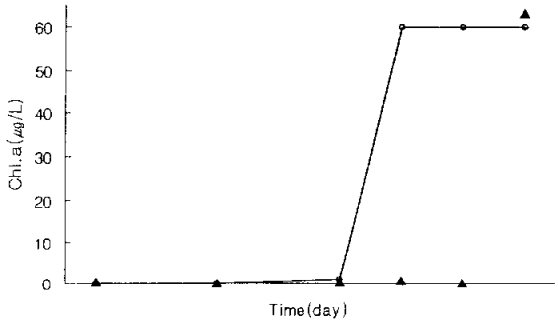
Fig. 4.9. Comparison between calculated and observed Chl. a(line: calculated, dot: observed).



St. 4



St. 5



St. 6

Fig. 4.9. Comparison between calculated and observed Chl. a(Continued).

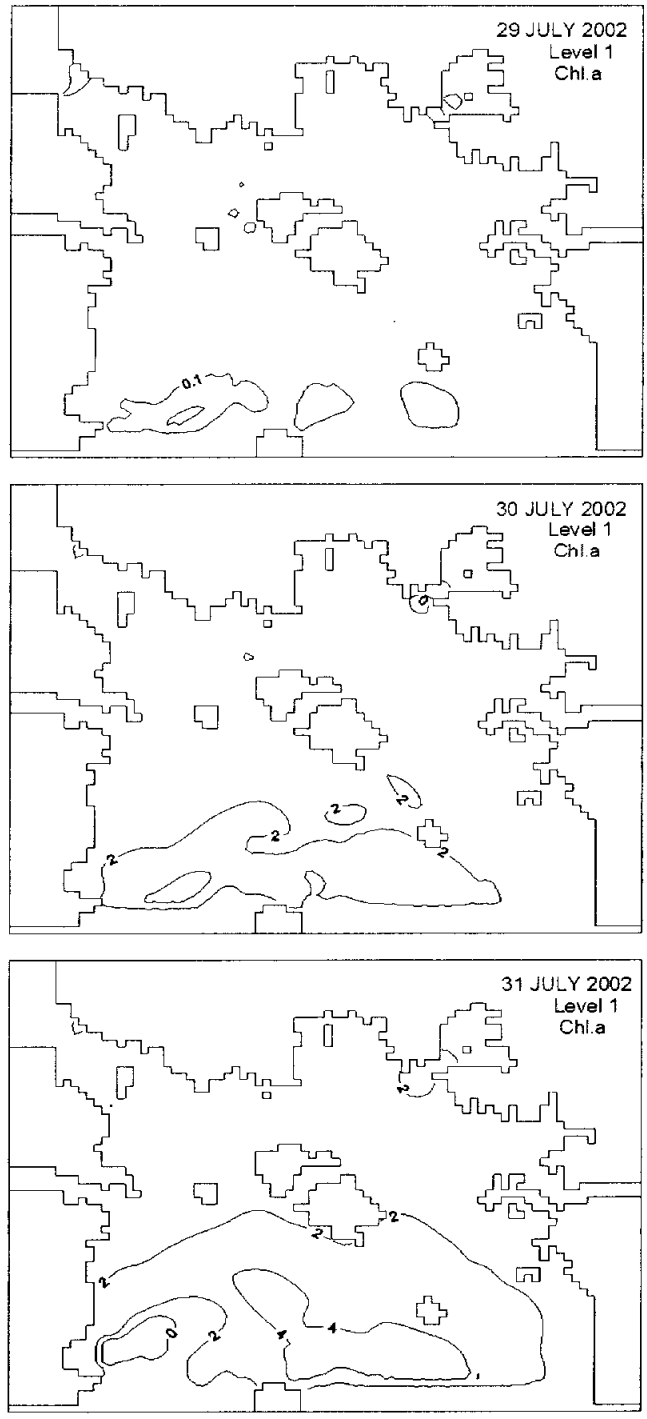


Fig. 4.10. Distribution calculated surface Chl. a for time dependent.

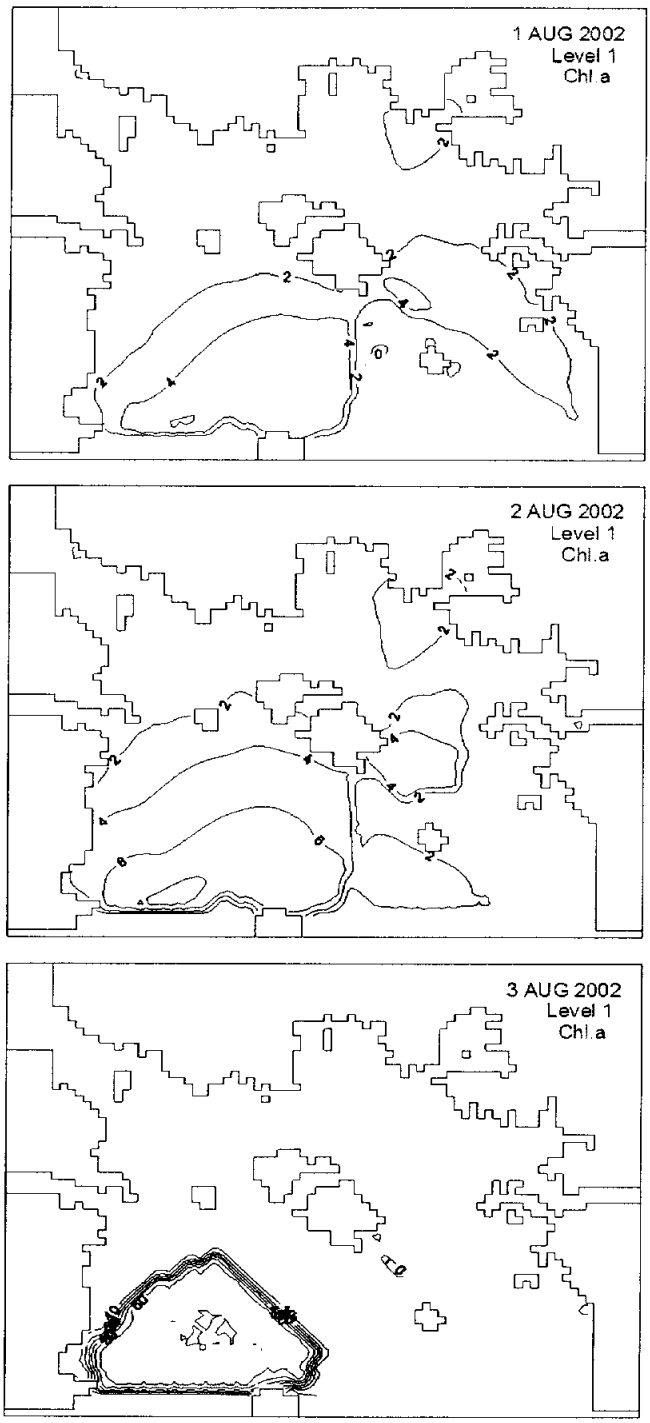


Fig. 4.10. Distribution calculated surface Chl. a for time dependent(continued).

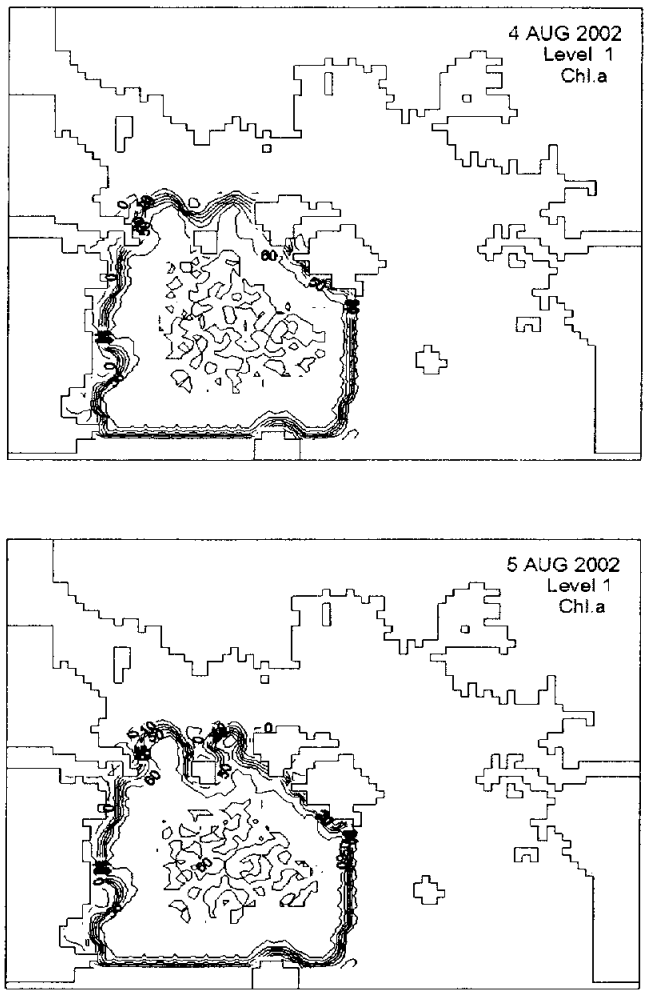


Fig. 4.10. Distribution calculated surface Chl. a for time dependent(continued).

생태계 내 구성 요소 중에서 식물플랑크톤의 성장이 어떤 인자들과 가장 민감하게 반응하는가를 평가하기 위한 수치 실험을 수행하였다(이, 2001). 민감도 분석에 사용된 생물 인자들의 초기치 자료(Table 4.2)에 대하여 식물플랑크톤성장에 가장 비중이 있다고 판단되는 해표면 일사량과 영양염에 대하여, St.1에서의 초기단계의 결과를 출력하여 비교하였다. 민감도는 초기치를 이용하여 시뮬레이션한 계산값과 초기치 인자를 조절(±50)%하여 시뮬레이션한 계산값을 아래와 같은 식을 이용하여 도출된 민감도 계수를 이용하여 평가하였다 (Dowd, 1997).

$$S = \left| \frac{\Delta V / V}{\Delta parameter / parameter} \right| \quad (3.4)$$

여기서, S : 민감도 계수

V : 초기치를 이용한 상태 변수 결과값

△V : 초기치와 초기치 변화에 의한 상태 변수 증감값

⊿parameter/parameter : 초기치의 변화폭

Table 4.2 Initial parameters in the ecosystem model for sensitivity analysis with phytoplankton growth and Sensitivity coefficients

Definition	Values	S
Intensity of radiation	60.28~549.77	0.632
Ccapacity of cell quota N, P	3.2~6.3, 6.2~12.98	0.520
Concetration of Nutrients(N,P loads from river)	N:9.27E-03~1.25E02 P:2.76E-00~1.77E06	0.710
Concetration of Nutrients(N,P loads form sediments)	N:2.88, P:0.36,	0.883

생태계 모델의 계산 결과가 안정하다고 가정하여, 해표면의 최대 일사량과 세포내 영양염 축적량, 하천에 의한 육상부하량 및 퇴적물 용출에 의한 영양염 부하량에 대하여 민감도를 분석한 결과, 전체 항목에서 높은 민감도를 보이지는 않았지만(1>), 식물플랑크톤 성장에 대해서 가장 큰 변동의 폭을 보인 항목은 퇴적물 용출 영양염의 증감으로 나타났다. 본 연구에서는 퇴적물 용출에 있어서 전 정점에 대해 같은 값을 적용하였기 때문에 bloom의 발생이 특정지점의 영양염 용출 특성 때문이라고 단정짓기는 어렵지만 하천을 통한 육상 부하량 자체가 다른 해역에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에 해역 전체로 볼 때 퇴적물로부터의 영양염의 공급이 큰 의미를 가진다고 말할 수 있다. 또한, 세포내의 영양염 함량에 대한 값이 광합성 작용에 큰 영향을 주는 일사량의 증감에 따른 변동과 유사한 정도의 영향을 준다고 볼 때 생물의 특성자체가 본 해역의 bloom에 대해서 크게 기여한다고 생각되어진다.

더욱이, 부하증감에 따른 민감도가 낮은 것은 자체적인 생물생산과정보다는 장소의 집적에 의한 영향이 크기 때문이라고 여겨진다.

4.4 *Cochlodinum* 적조의 발생 기작

4.4.1 *Cochlodinum* 적조 발생 기작에 관한 연구

적조현상이란 바다에 서식하는 미생물이 번식에 알맞은 환경조건이 될 때 일시에 많은 양이 번식되거나 또는 생물·물리적 현상으로 집적되어 바닷물의 색깔이 변색되는 현상을 말한다. 적조의 발생 기작은 현재까지도 전체가 명확하게 알려지지는 않았지만, 이때 적조발생에 필요한 환경조건을 요약하면 다음과 같다(岡市友利, 1987; NFRDI, '한국연안의 적조', 1998).

a. 일정 영양염류 농도를 유지할 수 있도록 지형적으로 해수교환이 적은 폐쇄성 내만해역
b. 육지로부터의 강우와 해저 퇴적물로부터의 용출에 의하여 적조생물의 성장 번식에 필요한 영양염류와 성장을 촉진하는 비타민류, 철, 망간 등의 미량원소의 공급
c. 적조생물의 광합성에 필요한 일조량이 충분하고, 해수 온도가 증식에 알맞아야하며, 안정된 수괴

즉, 적조발생의 기작에 있어서, 물리적, 화학적인 인과관계에 크게 좌우된다는 것을 의미한다. 국내의 적조발생기작에 관한 연구도 이러한 내용을 바탕으로 하고 있다.

Cochlodinium polykrikoides 적조가 최초 발생하는 해역의 영양염 수준은 비교적 낮은 것으로 관측되고 있는데, 임 등(2002), 김 등(2001c)와 이 등(2001b)이 배양실험에 의해서 밝혀낸 본 종의 생리 생태적인 특성은 외양성 종(Eplpley et al., 1969)에 비해 높고, 연안성 편모조류에 비해서는 낮기 때문에 부영양화된 해역보다는 부영양화 초기의 해역을 선호하는 것으로 보인다.

적조가 빈발하고 있는 남해안 일원의 해양의 조건은, 외부로부터 유입되는 해류에 의해 크게 좌우되는 것을 볼 수가 있는데, 부영양화된 남해 연안수가 수온과 염분이 다소 높은 대마난류와 만나 수온 약층이 소멸되는 전선역에서 가장 빨리 적조형성 밀도에 이르는 것으로 나타났으며, 이와 같은 해역은 남해의 외측인 나로도 및 남해도 연안으로 보고하였다(Kim et al., 1999a). 이것은 제주해협 서편 해역 저염수의 유입(Cho, 1995), 적조가 빈발하는 나로도와 소리도 사이의 해역의 하계 해수 특성이 남해

외해역의 해수 특성에 의해 주로 지배된다는 것(Choi, 2001)과도 뜻이 통한다. 또한, *Cochlodinium polykrikoides*의 최초발생이 보고되고 있는 고흥 나로도 및 여수해만 해역에서는 한반도 남해해역에서 여러 해수가 영향을 미쳤기 때문으로 보고 있으며(Lim et al., 2002), 특히 대마난류와 남해연안류사이의 남해 해양전선역의 높은 생산력에 기인하는 것으로 보고되고 있다. 특히, 2001년의 경우 유영세포의 최초발견은 적조생물이 7월말 경부터 제주도 동부와 남해안 중서부 해역에서 저밀도로 넓게 출현하였으며, 나로도~금호도간 수역에서 다른 인접해역보다 고밀도(300 cell/mL)로 존재하고 있었다고 밝히고 있는데(제225회 정기회 국정감사, 2001, NFRDI), 이러한 외부로부터 유입되는 해류의 영향에 의한 적조의 최초발생은 유영세포가 직접적으로 이송되어 영양염이 비교적 풍부한 연안해역에서 bloom이 시작된다는 가능성도 유추할 수 있다. 뿐만 아니라, *Cochlodinium polykrikoides*의 적조발생은 수온 약층의 소멸과 밀접한 관계가 있다(Lee et al., 2001). 이것은 먼저 휴면포자가 존재한다면(Kim et al., 1996) 휴면포자가 저층 수온의 상승으로 발아하여 표층으로 이동할 수 있으며, 또는 이미 존재하는 유영세포가 유입하거나, *Cochlodinium* 이외에도 저밀도의 다수 종이 혼재할 때 본 종의 대량번식이 가능하기 위해서는 본 종이 증식에 최적의 환경조건이 만족되어야 한다는 것이다. 즉, 태풍 등에 의해 표저 수온차이에 의해 유지되던 수직적인 성층이 파괴되어, 영양염류 및 증식관여물질이 유입된다는 것이다. 또한, 하계에 남해안 일원에 대마난류가 지속적으로 영양을 미치며, 수온 약층이 소멸되면서 투명도가 점차 높아지는 시점에서 적조의 최초발생이 이루어 질 것이라는 것(Jung et al., 1999)이다. Fig 4.5는 Appendix 1~8에 나타낸 바와 같이 관측기간내의 투명도(m)를 나타낸 것인데, 실선은 외해측인 St. 4~6의 값을 나타내었으며, 점선은 내해측인 St. 1~3에서 관측된 값을 시간에 따라 나타낸 것이다. 전 정점에서 통영해역의 초기 *Cochlodinium* 적조 발생 시작일인 8월 3일 부근에서 투명도가 급작스럽게 증가하는 것을 관측할 수 있었다. 또한, 동물플랑크톤의 구성으로 관찰할 때 김 등의 연구에 의하면(Kim et al., 2002, NFRDI, '한국연안의 적조연구편람', 2002, 12-24) 적조발생시기의 최초발생지역에서는 쿠로시오 난류 지표종인 *Sagitta enflata*가 코클로디니움 적조 발생초기에 소량 출현하여 조사해역에 난류의 영향이 미쳤음을 알 수있었다. 최초발생해역 부근의 넓은 지역에서 이 쿠로시오 난류의 지표생물이 발견되는 것은 적조생물의 최초 발생과

쿠로시오 난류의 유입과 어떤 관계가 있다고 생각되어 지는 것을 뒷받침 해준다(Jung et al., 2001).

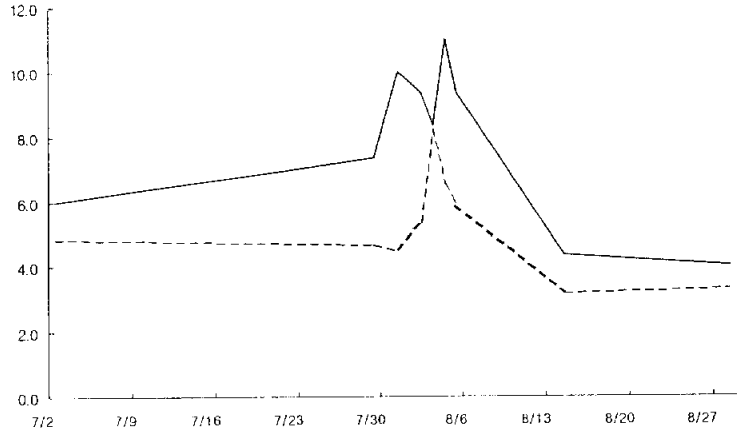


Fig 4.11. Variation of Secchi depth in Tongyeong sea(Dotted line-St1,2,3; Solid line-St.4,5,6).

그러나, 최근 문제가 되고 있는 유해적조를 일으키는 종인 편모조류의 경우는 양상이 다르다(NFRDI, '한국연안의 적조', 1998).

d. 규조류와는 달리 질산염, 인산염과 같은 성장제한요인 이외에 육지로부터 유입되는 비타민류, 미량금속, 특수유기물질 등 증식 촉진 물질의 영향을 크게 받는다.

e. 편모조류는 운동기관으로 2~4개의 편모를 가지고 있기 때문에 이동하는 능력이 있으며, 이동방향을 빛 또는 특수한 화학물질의 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

f. 휴면포자를 형성하기 때문에 겨울철과 같은 부적당한 시기를 해저 퇴적층에서 보내다가 적당한 환경이 되면 이들 포자가 발아하여 표층에 올라와서 급격히 번식함으로써 적조를 일으킨다. 특히, 최근 유기물질이 많이 퇴적된 해역에서 계절에 관계없이 같은 해역에서 같은 종에 의한 적조가 매년 발생하므로 휴면포자가 적조발생에 깊이 관여하고 있는 것을 알 수 있다.

이러한 내용은 앞서 말한 여러 가지 요인들과, 편모조류 자체의 생물적인 특성이 편모조류에 의한 유해적조를 일으키는데 크게 관여한다고 요약할 수있다. 편모조류가

일주 연직이동을 보이는 것은 많은 연구자에 의해, 보고되고 있는데(Eppley et al., 1968; Kamykowski & Zentara, 1977; Blasco, 1978; Heaney & Furnass, 1980; Staker & Bruno, 1980; Heaney & Eppley, 1981; Heaney & Eppley, 1981; Kamykowski, 1981; Cullen & Horrigan, 1981), 편모조류가 나타내는 연직이동성은 단순히 해면의 집적작용을 나타내는 것 뿐 만 아니라, 영양염이 풍부한 하층으로 이동하여 증식에 필요한 영양염을 섭취하는 동시에, 광합성을 하는데 필요한 유광층으로 상승하는 것이 가능함으로, 편모조의 개체군의 발달에 중요한 역할을 한다고 생각되기 때문에, 저층 수온의 상승으로 인한 영양염 용출량의 증가와 중요한 관련이 있다고 생각된다. 실제로 *Cochlodinium polykrikoides*은 연직 이동에 의해 16:00에 표층에서 집접하여 가장 높은 농도를 보이고, 19:00-20:00에는 저층에서 가장 높은 농도를 보이며, 연직 이동 속도는 3m/hour에 해당한다고 알려져 있다(Park et al., 2001).

와편모조류의 생태학은 종 특유의 적응 및 생존 전략과 경향에 철저히 따른다 (Smayda et al., 2003; Smayda, 2002; Smayda et al., 2001; Smayda, 1997). 와편모조류 *Scrippsiella trochoidea, Alexandrium tamarense* cyst의 발아(Han et al., 1999)는 각각 9~12월, 11월~12월에 분포하고 있어, 성장이 불리한 동계에 유영세포로 수중생활을 한다는 것으로 밝혀졌다. 이는 개개의 종에 따른 생존전략이 생리 생태적인 특성(Eco-Physiological characteristics)을 형성하기 때문에 생물의 개별적인 생리 생태적인 특성을 반드시 고려하여야한다.

식물플랑크톤의 기초생산에 영향을 가장 크게 미치는 물리 화학적인 인자로서는 광량, 영양염과 물리적 안정도(Physical and chemical Factors affecting primary productivity : light, nutrients, turbulence, James et al., 1982; Graham, 1998 ; Anderson et al., 1996)로 표현된다. *Cochlodinium polykrikoides*에 관하여 실내 배양실험을 통해 얻어진 각각의 자료는 아래의 Table 4.3에 나타내었다.

생태학적으로 중요한 반포화상수(K_s)값에 대해서 *Cochlodinium polykrikoides*는 외양종이라기 보다는 대형종의 그것과 유사하여, 외해의 환경보다는 높은 영양염을 요구하나, 고농도의 암모니아에서는 성장의 저해가 이루어진다는 것이 밝혀져 있다 (Kim, 1999).

Table 4.3. The optimal growth condition with physico-chemical environment to culuturing *Cochlodinium polykrikoides* in Korea

	Temp. ℃	Sal.	pH	Light lux	Nitrate	Ammonia μM	Phosphate
Kim(1999)	25	40	7.5	7,500	40	50	5
An(1998)	0~50	27~34	7.4~9.0	6,000	·	·	·
Shim(1998)	22~24	25~33	·	7,400~10‡	·	·	·

‡ : conversion value photon irradiance to intensity of illumination in white fluorescent light(Thimijan and Heins, 1983).

Table 4.4. The C/N ratio of Cochlodinium polykrikoides in culture condition (Redfield ratio C : N : P = 106 : 16 : 1 by atom = 41 : 7.2 : 1 by weight by Kang et al., 2003, unpublished)

Days	Carbon pg/cell	Nitrogen pg/cell	Cell density cell/mL	C/N ratio
0	**9.76**	**1.07**	**190**	9.12
4	2.72	0.33	880	8.24
8	1.66	0.18	1760	9.22
12	1.40	0.16	3300	8.75
16	1.53	0.13	3380	**11.77**
20	1.62	0.16	3400	10.13
24	1.77	0.25	2890	7.08
				9.19(Avg.)

Table 4.4에서는 배양조건하에서 본종의 세포당 C/N비를 측정한 값을 나타낸 것이다. 이것은 본종이 최고의 세포밀도로 되어 가면서 세포내의 질소량이 Redfield비를 상회하여 증가하는 것을 알 수가 있는데, 이 것은 개체군이 최대성장 속도(대수증식기)가 되는 시기에는 C/N ratio가 높아짐으로써, 즉 단위개체당의 질소함량이 작아짐으로써 낮은 영양염에도 개체군을 유지하려는 특성으로 여겨진다.

Table 4.5 Uptake of organic material by dinoflagellates

Researcher	Sp.	Uptake
Mineo Yamaguchi, 2001	*Heterosigma Circularisquama*	Organic and Inorganic P and
Mineo Yamaguchi, 1999	*Gymnodinium mikimotoi*	Organic and Inorganic N/P
Mineo Yamaguchi, 1994	*Gymnodinium Nagasakiense*	Organic and Inorganic N/P
Hiroyama et al., 1989	*Gymnodinium mikimotoi*	Organic and Inorganic P and
Watanabe et al., 1982	*Heterosigma akasiwo*	Inorganic N/P
Nakamura et al., 1985	*Chattonella antiqua*	Inorganic N/P
	Cochlodinium Polycrikoides	?

Table 4.5에는 여러 가지 와편모조류 종들에 대한 유기질소와 인의 섭취능력에 대하여 나타내었다. 유기인의 섭취능력이 있다는 것은 자연상태의 해수에서 '인'제한 환경을 극복하는 능력이 있다는 것을 의미한다. 차후의 연구에서는 식물플랑크톤의 유기인과 질소의 섭취의 능력을 포함하는 모델의 개발이 진행되는 것도 흥미로울 것이다.

Table 4.6. Cell quota N,P of several dinoflagellates

Researcher	Sp.	Qn(pmol/cell)	Qp(pmol/cell)
Mineo Yamaguchi, 2001	*Heterocapsa Circularisquama*	1.10	0.089
Mineo Yamaguchi, 1999	*Gymnodinium mikimotoi*	3.13	0.250
Mineo Yamaguchi, 1994	*Gymnodinium Nagasakiense*	3.85	0.290
Hiroyama et al., 1989	*Gymnodinium mikimotoi*	-	0.370
Watanabe et al., 1982	*Heterosigma akasiwo*	1.44	0.095
Nakamura et al., 1985	*Chattonella antiqua*	7.80	0.620
	Cochlodinium Polycrikoides	?	?

Table 4.6에는 여러 가지 와편모조류 종들에 대한 세포내 질소와 인의 함량을 나타낸 것이다. 세포내 질소와 인의 함량은 영양염이 고갈된 후에도 개체군이 한동안

급속도로 저하되지 않는 것 혹은 최대성장 가능농도에서도 급작스런 증식이 이루어지지 않는 특성(luxury consumption)을 설명해 주는 데, 이에 의하면 영양염의 이용능력이 *Heterocapsa Circularisquama* > *Gymnodinium mikimotoi* > *Chattonella antiqua*의 순으로 강하다는 것을 알 수 있다. 유기물의 섭취능력이나 세포내 저장능력에 대해 *Cochlodinium Polycrikoides*에 관해서는 아직 밝혀진 바가 없지만, 와편모조류의 생리생태적인 특성에 미루어 종합해 볼 때 외양성종에 가까운 본 종 또한 거대한 군집을 유지하기 위해서는 어느 정도 수준의 영양염이 공급이 되어야 한다는 결론을 내릴 수가 있다. 통영-사량도 해역에서도 해마다 대규모의 적조가 발생한다는 것은 적정한 영양염의 공급이 이루어지고 있다는 결론을 내릴 수 있다. *Cochlodinum*의 생물적인 특성을 적조 발생에 관한 modeling에 적용하기 위해서는 휴면포자의 형성과 발아, 연직이동특성을 이용한 저층의 영양염 이용능력 등이 반드시 고려되어야 하겠지만, 본 연구에서는 영양염과 관련하여, 세포내의 축적하는 특성만을 고려하였다.

특히, Yamaguchi(2001)의 연구에서는 세포내의 최소함량을 현장해역의 영양염 농도와 비교한 값으로서 식물플랑크톤의 성장 잠재력으로 표현하였는데, *Heterocapsa circularisquama*의 적조가 발생한 Hiroshima만의 경우 영양염 수준이 질소와 인의 경우 각각 7.8~12.1과 0.09~0.14μM로 나타났는데, 이 농도 범위에서는 Table 4.14에 나타낸 바와 같은 세포내 함량의 특성으로 추정할 때 약 1,010~11,000cell/mL의 개체를 유지 할 수 있다. 본 연구에서는 *Cochlodinium Polycrikoides*에 관해서 조사된 바가 없으므로 대신 적용했던 *Gymnodinium mikimotoi*의 값을 적용했을 때, 적조 발생의 환경이 조성된다고 여겨지는 8월 2일과 8월 3일의 현장 영양염 농도의 평균값인 질소와 인이 각각 1.83과 0.55 μM로 계산을 하면, 590~2,200cell/mL의 개체군을 유지할 수가 있다. 8월 5일 최초로 발생한 bloom에서의 세포밀도는 580cell/mL정도의 수준으로 앞서 이야기한 유동의 특성에 의해 안정으로 되어 가는 물리적인 특성을 이용할 때, 충분히 거대한 bloom을 일으킬 수가 있는 수준의 영양염 농도라고 생각되어 진다.

한편, 이 시점에서의 N/P를 살펴보면, 평균 3.32에 지나지 않는 것을 알 수 있는데, 이것은 인에 비해 상대적으로 질소의 농도가 낮아서, 본 해역은 질소의 제한 상태에 있다고 표현 할 수가 있다.

이 사실은 와편모 조류의 경우 질소와 인 제한 실험에서 각각 세포의 크기가 틀려

지며, 특히 인이 제한 될 때가 질소가 제한적인 환경일 때보다 세포의 크기가 더욱 커진다는 연구(Fuhs et al. 1972; Rhee, 1978; Yamaguchi & Itakura, 1999) 결과와 비교해 볼때, 본 해역은 질소가 제한 적이므로 상대적으로 작은 세포를 만들어 내고, 단위 개체당 요구되는 질소의 양도 더욱 작아진다고 생각 할 수가 있다(Table 4.12).

4.4.2 통영-사량도 해역의 *Cochlodinum* 적조 발생 기작

적조의 최초 발생은 거의 매년 외나로도(수심 >30m) 해역에서 발생하여, 통영해역에서는 조류의 유동패턴에서 보았듯이 남해 마안도 앞바다에서 먼저 발생하여 통영전역으로 전파되는 양상을 보이고 있다(Fig. 4.12). 마안도 앞쪽에서는 남해도 남쪽 혹은 서쪽으로부터의 조류가 유입되어 사량도 남쪽으로 빠져나가는 동시에 회전류가 형성되어 물리적인 집적이 이루어 질 수 있다.

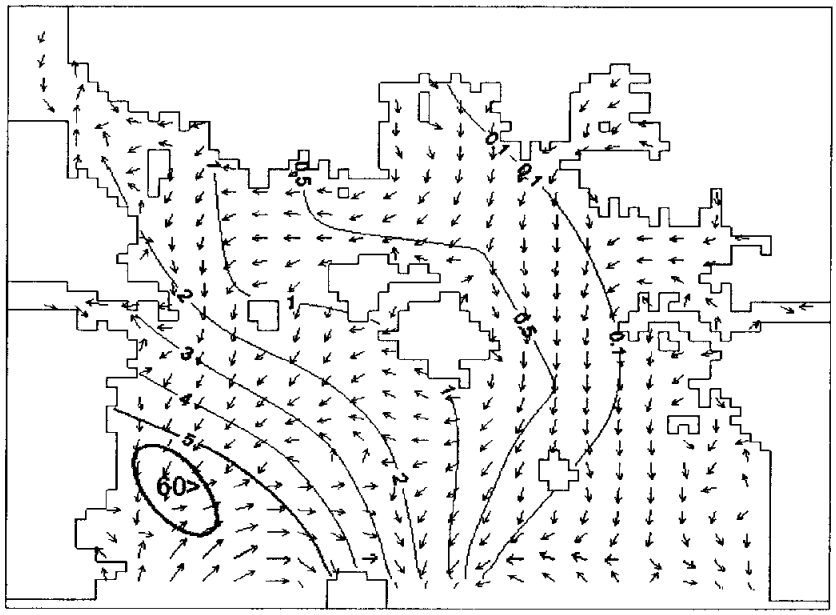


Fig. 4.12. Concentration of Chl. a and tidal current at the time of blooming start, in 5 Aug., 2002.

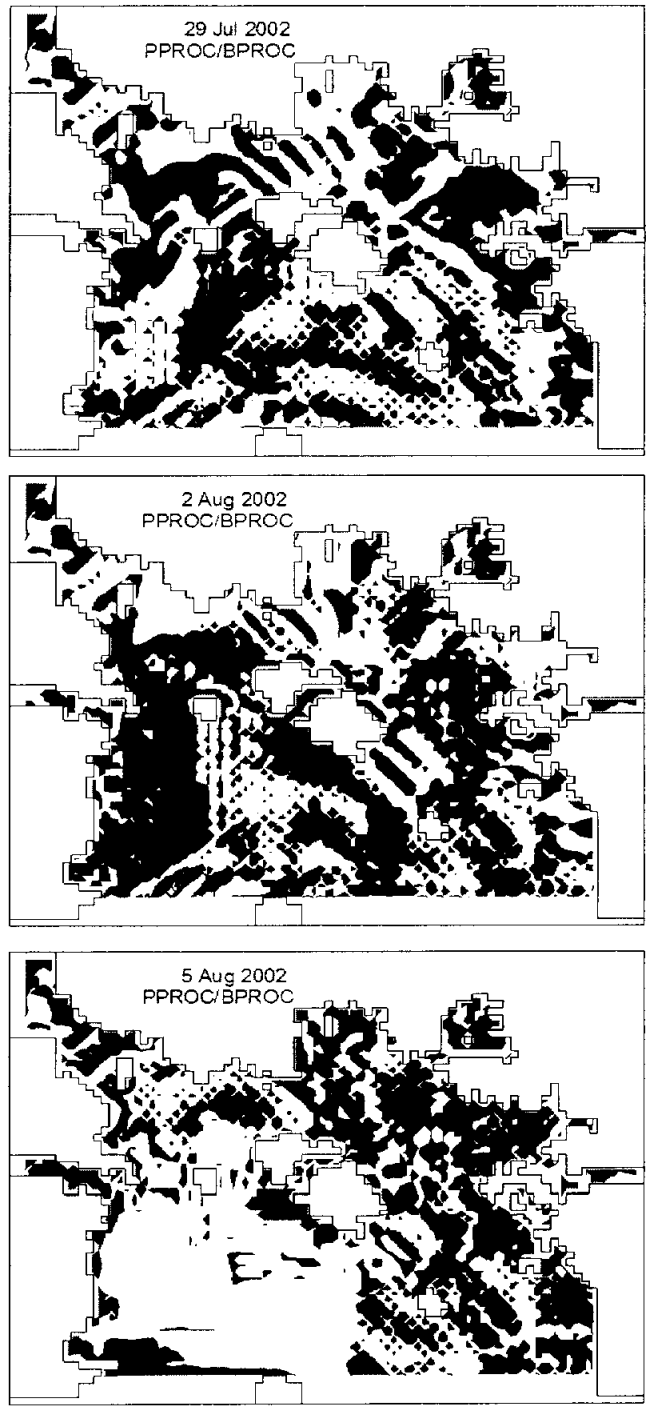


Fig. 4.13. The distribution of contributed physical process to Chlorophyll a at surface level according to time-dependent.

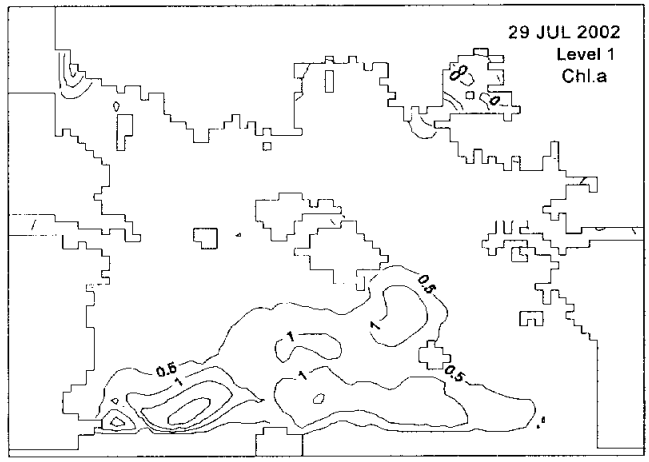
통영해역에서 이류 및 확산 등의 물리적 영향에 의해서 물질이 어떤 공간에서 집적될 것인가, 확산될 것인가와 내부생산과 같은 생물과정의 영향이 큰 것인가를 식물플랑크톤의 현존량에 대한 물리과정의 비율로서 평가한 것을 시간 변동에 따라 Fig. 4.15에 나타내었다(Lee, 1999). 즉, 계산된 식물플랑크톤 현존량에 대한 물리과정의 기여율을 (+)항과 (-)으로 크게 구분하였는데, (+)항은 물리적인 과정에 의해 증가되므로 물리적인 집적과정이라 판단되고, (-)항은 반대로 물리적 과정에 의해 어떤 공간에서 확산된다고 할 수 있다. 그리고 물리과정의 비율이 0이 되면 확산과 집적이 평형을 이룬다고 평가할 수 있다. 이러한 관점에서 적조발생 이전의 시기에는 계산영역 내부의 대부분이 (-)항(붉은색)으로 되어 있어서 확산이 크게 되는 양상을 보이고 있는데, 적조 발생 직전에는 연구영역에서 최초로 적조가 발생한 지역부근에서 집적이 이루어지는 환경이 조성되고, 적조발생시기에는 평형을 이루는 물리적 양상을 뚜렷하게 보여주고 있다. 이것은 cyst의 발아와 이것의 유영세포화 하기 위한 적당한 환경이라기보다는 외부로부터 유입된 세포가 더 큰 군집을 형성하기 유리하다고 볼 수 있는데, 이것은 통영-사량도 해역이 본 종의 적조발생의 seed-bank(intiation zone of red tide; Steidinger et al., 1981)의 역할을 하는 해역은 아니라는 견해로 설명할 수있다.

따라서, 본 해역에서는 내부 생산에 기인하여 형성되는 적조라기보다는 인근의 적조 빈발지역(남해도 서쪽, 외나로도 해역)에서 초기에 발생한 유영세포가 물리력에 의해 이류 확산되어 유입되고, 이것이 군집성장에 유리한 환경(수온, 염분, 영양염)을 이용하여, 발달하고 다시 확산되어 이송될 것으로 생각된다. 이것은 물리적인 외력에 편승하는 개체군의 전략적인 동태로 해석할 수 있다(Smayda et al., 2003; Smayda et al., 2001; Smayda, 1997).

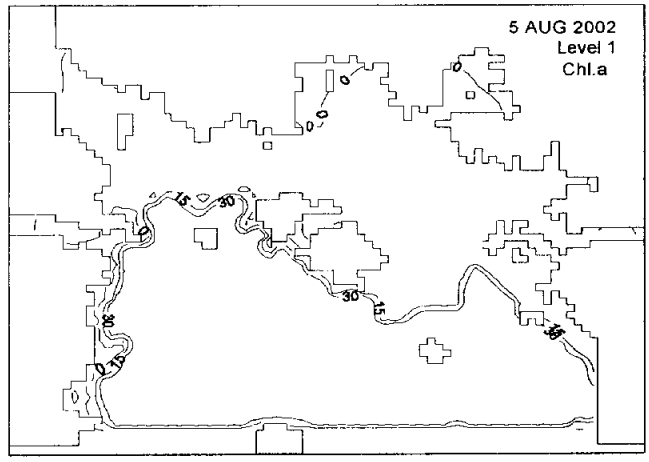
유해적조의 발생을 제어하기 위해서 고려할 수 있는 것은 모델링 연구에서의 발생조건을 역으로 추적하여 입력인자의 조절을 통하여 발생이 되지 않은 조건을 찾는 방법으로 수질관리방안을 모색할 수가 있다. 본 연구의 모델링에 의해서 고찰한 식물플랑크톤의 bloom에 크게 영향을 준다고 판단되는 인자 중에 가장 큰 역할을 하는 것이 물리적인 집적이다.

그러나, 물리적인 집적을 막기 위한 노력을 수질관리를 위해 시도한다는 것은 현

실적으로 불가능하다. 따라서, 가능한 형태의 제어방안은 식물플랑크톤의 성장에 중요한 의미를 가지는 인자에 대한 증감을 통해서 찾는 것이 옳다. 그러나, 여러 가지 인자들이 중첩되어 영향을 주므로 선형적인 관계를 도출해 내는 것이 쉽지 않다.

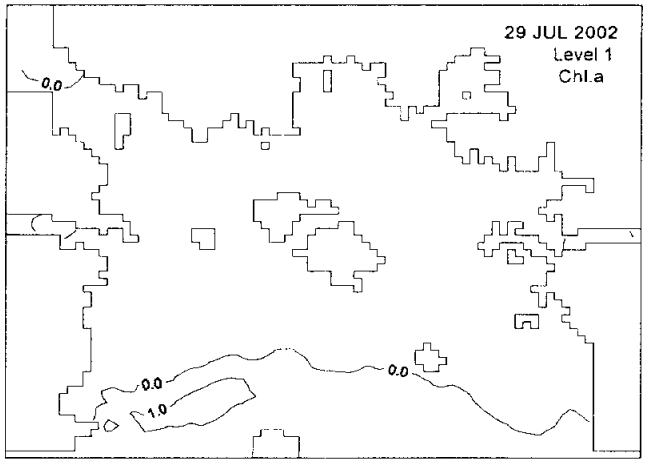


(a)

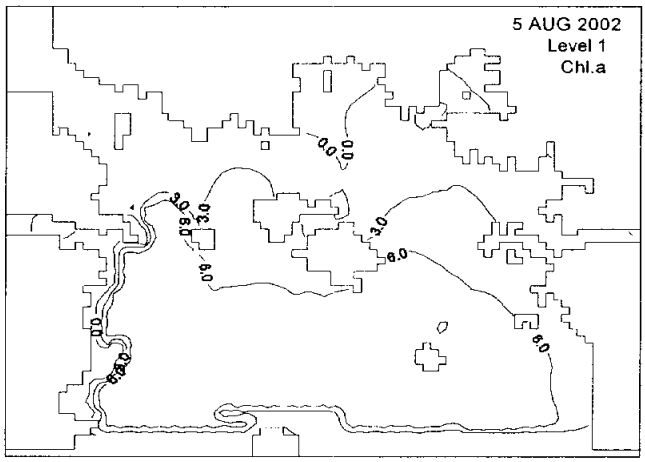


(b)

Fig. 4.14. Distribution calculated surface Chl. a when 60% cut down each condition(a: 29 Jul., b: 5 Aug.).



(a)



(b)

Fig. 4.15. Distribution calculated surface Chl. a when 80% cut down each condition(a: 29 Jul., b: 5 Aug.).

따라서, 본 연구에서는 식물플랑크톤의 증식이 폭발적으로 이루어지지 않는 조건에 대하여 고찰하기 위해, 민감도 분석(Table 4.2)을 실시했던 인자 중에서 단일 항목의 감소에서는 민감도가 낮기 때문에, 일사량의 강도, 하천을 통한 육상의 유입부하량, 퇴적물의 용출 영양염 부하량을 감소시키는 조합을 모델링하였다.

Fig. 4.14는 모델영역내의 초기 영양염 농도를 60%, 일사량의 크기를 60%, 하천

부하량을 60%, 퇴적물 용출 영양염 부하량을 60% 및 개방경계에서의 영양염 농도를 60%를 감소시킨 결과이며, Fig 4.15는 초기 영양염 농도를 80%, 일사량의 크기를 80%, 하천 부하량을 80%, 퇴적물 용출 영양염 부하량을 80% 및 개방경계에서의 영양염 농도를 80% 감소시켰을 때의 식물플랑크톤의 양의 분포를 나타낸 것이다. Fig 4.16에는 bloom이 시작되었으며, 식물플랑크톤의 농도가 가장 높은 정점인 St. 6에 대하여 Fig 4.15~4.16을 위한 조건을 100%일때와 비교하여 각각 50%, 60%, 80% 감소시켰을 때의 시간변동을 나타내었다.

Fig 4.14~4.16을 살펴보면 계산에 사용된 수식자체에는 비선형항이 존재하지 않지만 계산 결과에서는 입력값의 감소에 따른 정확하게 선형적인 관계라고 볼 수는 없다. 그러나, 각각의 농도값을 낮게 하였을 경우에 차차 낮아지는 응답의 특성을 보이고 있다. 특히, 80%를 삭감하였을 때는 적조 발생농도인 10μg/L 보다 낮은 값을 유지하였는데, 이 때의 해역의 현존량인 초기값은 DIN이 0.21μM이며 DIP가 0.04μM의 수준을 유지하여야 한다.

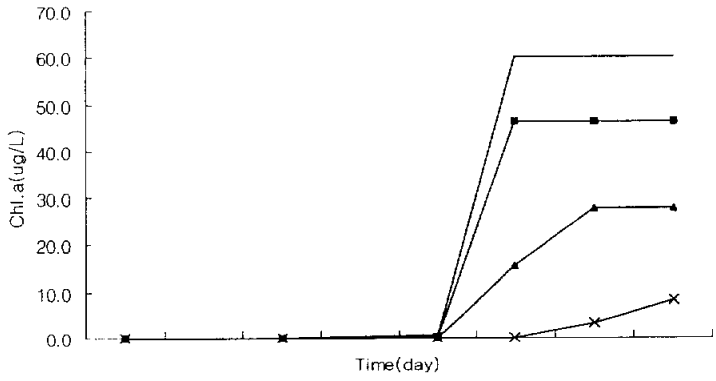


Fig. 4.16. Calculated surface Chl. a each condition(solid: 100%, -■-:50%, -▲-:60%, -×-:80%)

하천의 부하량 자체가 무시할 수 있을 만큼 미미하고, 입력된 퇴적물의 용출 영양염도 높은 수준이 아니기 때문에, 영양염의 초기값, 일사량의 저하와 각각의 개방경계에서의 영양염의 변동이 큰 의미를 가진다고 볼 수가 있다. 따라서, 해역의 영양염 현존량이라고 볼 수 있는 초기 영양염 농도와 경계의 영양염 농도의 감소가 적조발생의

가장 큰 제어 인자라고 할 수 있겠다. 그러므로, 해역의 현존 영양염 농도가 다른 해역에 비해서 낮은 값이지만, 본 종의 식물플랑크톤의 bloom에는 충분하며, 이를 저감할 수 있는 노력이 더해져야 한다고 볼 수 있다.

Fig. 4.17에는 1986년부터 2002년까지의 통영해역의 영양염 변동과 부영양화 지수(Eutrophication index, EI)를 나타내었다(Okaichi,1972).

$$EI = \frac{COD(mg/L) \times DIN(\mu M) \times DIP(\mu M)}{3.43} \tag{4.1}$$

Fig. 4.18에는 부영양도와 영양염에 의한 식물플랑크톤의 성장가능성(Growth potential, GP)를 계산하여 나타내었다(Yasuo et al., 1988).

$$GP = \mu_{\max} \cdot \frac{S_N}{K_g^N + S_N} \cdot \frac{S_{PO4}}{K_g^P + S_P} \tag{4.2}$$

Fig.4.16과 17에 의하며, 통영 사량도 해역에서의 부영양화지수(EI)와 식물플랑크톤 성장의 잠재력(GP)이 낮은 수준이지만 해마다 점차로 증가하고 있는 추세라는 것을 살펴볼 수 있다. 이것은 육상으로부터의 오염부하가 심각하지 않을 뿐만 아니라. 근해의 마산만이나 진해만과 같이 폐쇄적인 환경이 아니면서 외해로 개방적인 해역이며, 유동의 특성이 물리적인 집적의 성격이 낮음에도 불구하고, 계속적으로 부영양화가 증가하고 있다는 것이다. 따라서, 적조로 인한 수산피해를 줄이기 위해서는 이러한 현상에 대한 수질관리의 대책이 선행되어야 하는데, 이러한 부영양화를 증가시키는 주된 오염원은 물론 본 연구에서 수행된 모델에서는 포함하지 못한 다른 부분, 즉, 가두리 양식장에서의 부하 및 그 저층 퇴적물로부터의 부하, 굴양식장에서의 부하 등에 의한 영향을 차후의 연구에서는 고려할 필요가 있다고 생각된다.

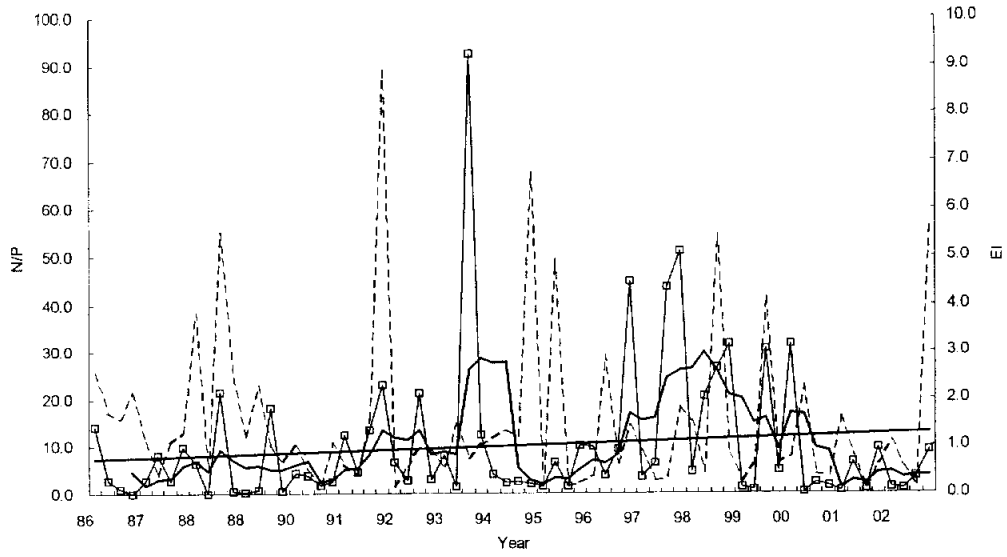


Fig. 4.18. Annual variation of EI and N/P value in Tongyeong area, 1986-2002(Dotted: N/P, -□-: EI, solid: 4point moving average of EI). EI is the Eutrophication Index(Okaichi, 1972).

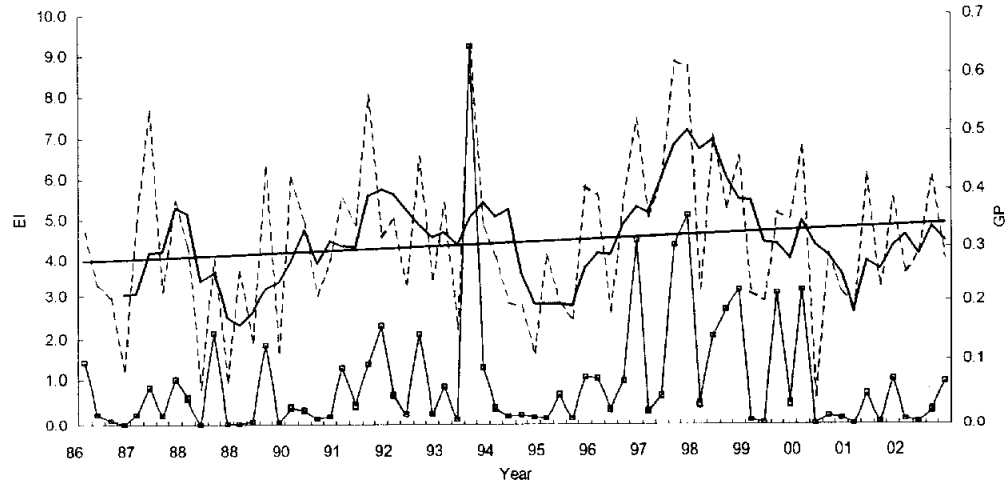


Fig. 4.19. Annual variation of GP and EI value in Tongyeong area, 1986-2002(Dotted: GP, -□-: EI, solid: 4point moving average of GP). GP is the Growth Potential index of phytoplankton about nutrients(Yasuo, 1989).

V. 결론

통영-사량도에서의 적조발생기작을 밝히기 위한 적조생태계 모델링 연구를 통해 정리한 결론은 다음과 같다.

1. 통영-사량도 해역에서 발생하는 *Cochlodinium Polycrikoides* 적조는 적조발생의 메카니즘은 내부에서 발생하는 것이 아니라 인접한 발생원에서 이송되어 유입되는 형태를 가지고 있다. 특히, 본 연구에서는 고려되지 않았던 해류와 같은 물리력의 역할은 간접적으로 관측할 수 있었고, 조류의 이동에 의한 물질 수송에 따라서 생물의 이송도 이루어지고 있다고 판단할 수 있다.

2. Droop식을 고려하여, 세포 내부의 cell quota를 포함하여 식물플랑크톤 성장을 시뮬레이션 한 결과, 영양염 수준이 상대적으로 낮은 통영-사량도 해역에서의 초기조건과 경계조건에서도 큰 군집을 이루어 내는 modelling이 가능하였는데, *Cochlodinium Polycrikoides*은 상대적으로 영양염수준이 낮은 곳에서도 bloom을 일으킬 수 있었다. 이것이 의미하는 것은 생물 특성에서 보다 낮은 영양염에서도 적응이 가능한 종중에서 이 환경에 적응할 수 있다면, 앞으로의 적조발생의 형태는 달라 질 수있다는 것이다. 또한, 배양실험을 통해 *Cochlodinium Polycrikoides*에 대해 보다 많은 정보를 획득할 수 있다면, 환경 중에서의 거동에 대해 보다 정확하게 접근 할 수 있을 것이다.

3. 통영-사량도 해역은 외양으로 개방적인 해역의 특성으로 집적보다는 물리적인 이류확산의 작용이 큰 해역임에도 불구하고, 현재 부영양화가 진행 되고 있으며, 식물플랑크톤의 성장 가능성(GP)이 높아지고 있어서, 굳이 영양염의 이용능력이 큰 종이 아니더라도 적조를 유발할 가능성 커지고 있는 실정이었다.

Reference

박석순, 이용석, 1999, 생명과학자를 위한 전산모형론, 동화기술, 313-324.

통영시, 2002, 통영시 통계연보.

한국기상청, 1987- 996, Annual weather report.

Anderson, D., Garrison, D., 1997, The Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms. American Society of Limnology and Oceanography, Limnology and Oceanography Special Issue, 42:5:2.

Arhonditsis G., Tsirtsis G., Angelidis M. O., Karydis M., 2000, Quantification of the effects of nonpoint nutrient sources to coastal marine eutrophication: applications to a semi-enclosed gulf in the Mediterranean Sea, Ecological Modelling, 129, 209-227.

Arhonditsisi G. et al., 2003, Eutrophication risk assessment in coastal embay- ments using simple statistical models, Marine Pollution Bulletin, In Press.

Arheimer B., Torstensson G., Wittgren H. B., 2003, Landscape planning to reduce coastal eutrophication: agricultural practices and constructed wetlands, Landscape and Urban Planning 1019, 1-11.

Caperon J. and Meyer J., 1972, Nitrogen-limited growth of marine phytoplankton I. changes in population characteristics with steady-state growth rate, Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, Vol. 19, 9, 601-618.

Caperon J. and Meyer J., 1972, Nitrogen-limited growth of marine phytoplankton II. Uptake kinetics and their role in nutrient limited growth of phytoplankton, Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, Vol. 19, 9, 619-632.

Cho Eun-Il , Park Chung-Kil, Lee Suk-Mo, 1996, Estimation of Carrying capacity in Kamak Bay(1) Estimation of Primary Productivity Using the Eco-hydrodynamic Model-) Jounal of Korean Fish. Society, 29(3), 369-385.

Cho Eun-Seob, Yun Seong-Jong, Bae Heon-Meen, Lee Pil-Yong, 1999, Binding Response of *Cochlodinium polykrikoides* to FITC-conjugated Lectin Probes Following Treatment with Yellow Loess, Bull. Nat'l. Fish. Res. Dev. Inst.

Korea, 57, 141-144.

Cho Eun-Seob, Kim Gi-Yong, Cho Yong-Chul, 2001, Molecular analysis of morphologically similar dinoflagellates Cochlodinium polykrikoides, Gyrodinium impudicum and Gymnodinium catenatum based on internal transcribed spacer and 5.8S rDNA regions, Algae, 16(1), 53-57, 2001.

Dowd M. 1997, On predicting the growth of cultured bivalves. Ecol. Mod., 104, 113-131.

Durbin E., 2002, North Atlantic right whales, Eubalaena glacialis, exposed to paralytic shellfish poisoning(PSP) toxins via a zooplankton vector, Calanus finmarchicus, Harmful Algae, 1, 243-251.

Edmondson, W. T., 1969, Eutrophication in North America. In Eutrophication: Causes, Consequences and Correctives. National, Academy of Sciences Pub., No. 1700, Washington DC, 124-149.

Foreman, M. G. G., 1977, Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction. Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, B.C., 58

Horiguchi F. and Terasawa T. , 2000, Analysis of water quality in Beppu bay using ecosystem model, 資源と環境, Vol.9, No.2.

Gene carl feldman, 1995, the script of "Ocean Planet," a 1995 Smithsonian Institution traveling exhibition, http://seawifs.gsfc.nasa.gov/ocean_planet.html

Granoli, E. et al., 1990, Nutrient limitation of primary production in the Baltic Sea area. Ambio 19, 142-151.

Graham P. Harris, 1998, Phytoplankton Ecology, Chapman and Hall, reprint edition, 119, 394.

Hansson, S. et al., 1990, Eutrophication and Baltic fish communities. Ambio 19, 123-125.

Jung Chang-Su, Choi Woo-Jeong, Kim Hak-Gyoon, Jung Yong-Gyun, Kim Jeong-Bae , Lim Wol-Ae, 1999, Interrelation Between *Cochlodinium polykrikoides* Blooms and Community Structure of Zooplankton in the Coastal Waters

around Namhaedo in the South Sea of Korea, 1998, Bull. Nat ' l. Fish. Res. Dev. Inst. Korea 57, 153-161.

Jeong Hae-Jin, Park Hong-Kyu, Choi Hyun-Yong, Yang Jae-Sam, Shim Jae-Hyung, Shin Yoon-Keun, Yih Won-Ho, Kim Hyung-Sup, Cho Kyeong-Jae, 2000a, The Outbreak of Red Tides in the Coastal Waters off Kohung, Chon-nam, Korea 2. The Temporal and Spatial Variations in the Phytoplanktonic Community in 1997, The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography, 5(1), 27-36.

Jeong Hae-Jin, Park Jong-Kyu, Kim Jae-Seong, Kim Seong-Taek, Yoon Joo-Eh, Kim Soo-Kyeong, Park Yong-Min, 2000b, The Outbreak of Red Tides in the Coastal Waters off Kohung, Chonnam, Korea 3. The Temporal and Spatial Variations in the Heterotrophic Dinoflagellates and Ciliates in 1997, The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography, 5(1), 37-46.

Kamykowski D., 1981, The simulation of a Southern California red tide using characteristics of a simultaneously-measured internal wave field, Ecological Modelling, Volume 12, Issue 4, 253-265.

Kang Yang-Soon, Kwon Jung-No, Shon Jae-Kyoung, Eom Ki-Hyuk, Hong Suk-Jin, Kong Jai-Yul, 2002, Exopolysaccharide Production by *Cochlodinium polykrikoides*(Dinophyceae) : Effects of the Nitrate and Phosphate Concentration, Bull. Nat ' s Fish. Res. Dev. Inst. Korea, 61, 97-103.

Kim Chang-Sook, Jee Bo-Young, Bae Heon-Meen, 2002, Structural alterations in the gill of the red sea bream, Pagrus major, exposed to the harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*, J. Fish. Sci. Tech. 5(1), 75-78.

Kim Chang-Sook, Lee Sam-Geun, Kim Hak-Gyoon, Lee Jong-Soo, 2001, Screening for toxic compounds in the red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*: Is it toxic plankton?, Algae, 16(4), 457-462.

Kim Chang-Sook, Bae Heon-Meen, Cho Yong-Chul, 2001, Control of harmful algal blooms by clay via photochemical reactions, Algae, 16(1), 67-73.

Kim Chang-Sook, Bae Heon-Meen, Yun Seong-Jong, Cho Yong-Chul, Kim Hak

-yoon, 2000, Ichthyotoxicity of a harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*: Aspect of hematological responses of fish exposed to algal blooms Journal of Fisheries Science and Technology, 3(2), 111-117.

Kim Chang-Sook, Lee Sam-Geun, Kim Hak-Gyoon, 2000, Biochemical responses of fish exposed to a harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 254, 131-141.

Kim Chang-Sook, Lee Sam-Geun, Lee Chang-Kyu, Kim Hak-Gyoon,Jung Jin, 1999, Reactive oxygen species as causative agents in the ichthyotoxicity of the red tide dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* Journal of Plankton Research, 21(11), 2105-2115.

Kim Dong-Sun, Cho Kyu-Dae, 1998, The Material Distribution by the Ecosystem Modeling in Suyoung Bay, Journal of the Environmental Sciences, 7(6), 817-825.

Kim Dong-Sun, 2003, A method of environmental management using an ecological numerical model in Jindong Bay, Journal of the Environmental Sciences, 12(3), 345-358.

Kwoun Chul-Hui, Cho Kyu-Dae, 2002, Numerical Model for Spreading of *Cochlodinium* Bloom in the Southern Coastal Waters in Korea, Journal of Korean Fisheries Society, 35(6), 568-577.

Kim G. S. , 1998, Numerical simulation of marine water quality in Ulsan Bay using ecosystem model, Journal of The Korean Institute of Port Research, 12(2), 313-322.

Kim Gwang-Su, Park Chung-Kil, Cho Eun-Il, 1996, The Estimation of Environmental Capacity in the Yellow Sea using an Ecosystem Model, Journal of Korean Society on Water Quality, 12(4), 383-399.

Kim Gwang-Su, Choi Young-Chan, 2000, The Estimation of Environmental Capacity in the Southern Coastal Area of Cheju Island using an Ecosystem Model, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, 3(1),

52-61.

Kim Hak-Gyoon, Jung Chang-Su, Lim Wol-Ae, Lee Chang-Kyu, Kim Sook-Yang, Youn Sung-Hwa, Cho Yong-Chul, Lee Sam-Geun, 2001, The Spatio-Temporal Progress of *Cochlodinium polykrikoides* Blooms in the Coastal Waters of Korea, Journal of the Korean fisheries society, 34(6), 691-696.

Kim Hak-Gyoon, Choi Woo-Jeung, Jung Yong-Gyun, Jung Chang-Su, Park Jong-Su , AN Kyoung-Ho, Baek Chul-In, 1999, Initiation of *Cochlodinium polykrikoides* Blooms and its Environmental Characteristics Around the Narodo Island in the Western part of South Sea of Korea, Bull. Nat ' l. Fish. Res. Dev. Inst. Korea, 57, 119129.

Kim Hak-Gyoon, 1998, *Cochlodinium polykrikoides* blooms in Korean Waters and their mitigation, Phycotoxins, Elsivier, 227-230.

Kim Hak-Gyoon, 1997, Recent Harmful Algal Blooms and Mitigation Stategies in Korea, Ocean Research, 19(2), 185-192.

Kim Hak-Gyoon, 1995, Noxious dinoflagellate bloom of an undescribed species of *Gyrodinium* in Chungmu coastal waters, Korea, Harmful Marine Algal Blooms. Lavoiser, Interpt Ltd., 59-63.

Kim Hyung-Chul, Chang-Kyu Lee, Sam-Geun Lee, Hak-Gyoon Kim,, Chung-Kil Park, 2001a, Physico-Chemical Factors on the Growth of *Cochlodinium polykrikoides* and Nutrient Utilization, J. Korean Fish. Soc., 34(5), 445-456.

Kim Hyung-Chul, Dong-Myung Kim, Dae-In Lee, Chung-Kil Park, 2001b, Limiting Nutrients of *Cochlodinium polykrikoides* Red Tide in Saryang Island Coast by Algal Growth Potential(AGP) Assay, Journal of the Korean Fisheries Society, 34, 5, 457-464.

Kim Jong-Gu, Park Chung-Kil, Kim Kwang-Su, 1994, The application of ecosystem model for the eutrophication control in Masan Bay in summer, Journal of the Environmental Sciences, 3(3), 185-195.

Kim Jong-Gu, Kim Yang-Soo, 2002a, Application of Ecosystem Model for

Eutrophication Control in Coastal Sea of Saemankeum Area 1. Characteristics of Water Quality and Nutrients Released from Sediments, Journal of the Korean Fisheries Society, 35(4), 348-355.

Kim Jong-Gu, Kim Yang-Soo, Cho Eun-Il, 2002b, Application of Ecosystem Model for Eutrophication Control in Coastal Sea of Saemankeum Area, Journal of the Korean Fisheries Society, 35(4), 356-365.

Kim Sang-Woo, Yutaka Isoda, Tomonori Azumaya, 2003, Seasonal Variation of Phytoplankton in the East Sea Using A Surface Mixed Layer Ecosystem Model, Journal of Korean Fisheries Society, 36(2), 178-186.

Kuninao Tada, Masakazu Morishita, Ken-ichiro Hamada, Shigeru Montani and Machiko Yamada, 2001, Standing Stock and Production Rate of Phytoplankton and a Red Tide Outbreak in a Heavily Eutrophic Embayment, Dokai Bay, Japan, Marine Pollution Bulletin, 42(11), 1177-1186.

Kyungsang Namdo, 2002, The status for marine and fisheries of Kyungsang Namdo, 199-200.

Lee Chang-Kyu, Kim Hyung-Chul, Lee Sam-Geun, Jung Chang-Su, 2001, Abundance of Harmful Algae, *Cochlodinium polykrikoides, Gyrodinium impudicum and Gymnodinium catenatum* in the Coastal Area of South Sea of Korea and Their Effects of Temperature, Salinity, Irradiance and Nutrient on the Growth in Culture, Journal of the Korean Fisheries Society, 34, 5, 536-544.

Lee Dae-In, Cho Eun-Il, Park Chung-Kil, 1999, The ecosystem modelling for enhancement of primary productivity in Kamak Bay, Journal of the Environmental Sciences, 8(5), 575-586.

Lee In-Cheol, Ryu Cheong-Ro, 2001, A Numerical Prediction of Nutrient circulation in Hakata Bay by Sediment-Water Ecological Model (SWEM), Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, 4(2), 3-14.

Roelke D. L. , 2000, Copepod food-quality threshold as a mechanism influencing phytoplankton succession and accumulation of biomass, and secondary

productivity : a modeling study with management, Ecological Modelling 134, 245-274.

Yang Jae-Sam, Hyun-Yong Choi, Hae-Jin Jeong, Ju-Young Jeong, Jong-Kyu Park, 2000, The Outbreak of Red Tides in the Coastal Waters off Kohung, Chonnam, Korea: 1. Physical and Chemical Characteristics in 1997, The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography, 5(1), 16-26.

John J. Walsh, Kenneth D. Haddad, Dwight A. Dieterle, Robert H. Weisberg, ZhenjiangLi, Huijun Yang, Frank E. Muller-Karger, Cynthia A. Heil, W. Paul Bissett, 2002, A numerical analysis of landfall of the 1979 red tide of Karenia brevis alongthe west coast of Florida,Continental Shelf Research,22, 15-38.

Lim Wol-Ae, Chang-Su Jung, Chang-Kyu Lee, Yong-Chul Cho, Sam-Geun Lee, Hak-Gyoon Kim, Ik-Kyo Chung, 2002, The outbreak, maintenance, and decline of the red tide dominated by *Cochlodinium polykrikoides* in the coastal waters off southern Korea from August to October, 2000, Jounal of the Korean Society of Oceanography, ' The Sea ' , 7(2), 68-77.

Lee Young-Sik, Young-Tae Park, Young-Sug Kim, Kui-Young Kim, Jong-Soo Park, Woo-Jin Go, Yeong-Jo Jo, Seong-Yoon Park, 2001, Countermeasure and Outbreak Mechanism of *Cochlodinium polykrikoides* red tide1. Environmental characteristics on outbreak and disappearance of C. polykrikoides bloom, Journal of Korean Society of Oceanography, 6(4), 259-264.

Lehman, J. T., Botokin, D.B. and Linkens, G.E., 1975, The Assumption and Rationales of a computer model of phytoplankton population dynamics, Lim. Oceanog., Vol. 20. No3, 343-364.

Marie H., 2001, Do Food Processing Industries Contribute to the Eutrophication of Aquatic Systems?, Ecotoxicology and Environmental Safety, 50, 143 - 152.

Michio Kishi, Saburo Ikeda, 1986, Population dynamics of 'red tide' organisms in eutrophicated coastal waters - Numerical experiment of phytoplankton bloom in the East Seto Inland Sea, Japan,Ecological Modelling, Volume 31, Issues

1-4, 145-174.

MOMAF, 1998, Studies on the development of marine ranchin program in Tongyeong, Korea.

Nakata Kisaburo, 1987, 沿岸生態系の解釋(J. N. Kremer and S. W. Nixon-A coastal marine ecosystem, simulation and analysis, 1978), Seibutsu-Kenkyusha, 35-57

Nixon, S. W., 1995, Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns. Ophelia 41, 199-219.

NFRDI, 2002, Sanitary Research of the designated area for shellfish production in the south sea of Korea, SSRFI, Shellfish sanitation report No. 8, 3-5.

NFRDI, 1997, Climatic atlas of Temperature in Korea waters(1966-1995).

NMPA, 2001, Marine pollution prevention plan of Tongyeong area.

OECD, 1982, Eutrophication of waters: Monitoring, assessment and control. OECD, Paris, 154.

Park Jong-Soo, Kim Hyung-Chul, Choi Woo-Jeung, Lee Won-Chan, Park Chung-Kil, 2002, Estimating the Carrying Capacity of a Coastal Bay for Oyster Culture I. Estimating a Food Supply to Oysters Using an Eco-hydrodynamic Model in Geoje-Hansan Bay, Journal of the Korean Fisheries Society, 35(4), 395-407.

Seo Pil-Soo, Sang-Jun Lee, Yoon-Kim, Jeong-Ho Lee, Hak-Gyoon Kim, Jae-Dong Lee, 1998, Axenic culture production and growth of a dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides*, J. Korean Fish. Soc., 31(1), 71-6.

Rast, W. and J. A. Thornton, 1996, Trends in eutrophication research and control. Hydrological Processes, 10, 295-313.

Rouzic B., Bertru G., 1997, Phytoplankton community growth in enrichment bioassays: possible role of the nutrient intracellular pools, Acta CEcologia, 18(2), 121-133.

Roelke D. et al., 1999, A model of phytoplankton competition for limiting and nonlimiting nutrients: Implication for development of estuarine and nearshore management scheme, 22, 92-104.

Shumway S. E., 2003, Marine birds and harmful algal blooms : sporadic victims or under-reported events?, Harmful Algae 2, 1-17.

Watanabe M., Nakamura Y. Mori S., 1982, Effects of physico-chemical factors and nutrients on the growth of Heterosigma akashiwo Hda from Osaka bay , Japan, Jap. J. Phycol. 30, 279-288.

Yamaguchi M. et al., 2001, Nutrition and growth kinetics in nitrogen- or phosphorous- limited cultures of the 'novel red tide' dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama*(Dinophyceae), Phycologia, Vol.40(3), 313-318.

Yamaguchi M. et al., 1999, Nutrition and growth kinetics in nitrogen- or phosphorous- limited cultures of the noxious red tide dinoflagellate *Gymnodinium mikimotoi*, Fisheries Science, 65, 367-363.

Yamaguchi M. et al., 1997, Effect of Temparature and Salinity on the growth of the red tide flagellates *Heterocapsa circularisquama*(Dinophyceae) and *Chatonella verruculosa*(Raphidophyceae). Journal of Plankton Research, 19, 1167-1174.

Yanagi T., Koichi Inoue, Sigeru Mntani, Machiko Yamada, 1997, Ecological modeling as a tool for coastal zone management in Dokai Bay, Journal of Marine Systems 13, 123-136.

Yanagi T., yamamoto T., Koizumi Y., Ikeda T., Kamizono M., Tamori H., 1995, A numerical simulation of red tide formation, Journal of Marine System, 6, 269-285.

Yun Jong-Sup, Kim Seung-Hyun, Yoon Cho-Hee, 2003, Red-Tide removal by Loess Spreading, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 25(3), 358-363.

Zingone A., 2000, The diversity of harmful algal blooms: a challenge for science and management, Ocean & Coastal Management, 43, 725-748.

Appendix

Appendix 1 The results of seawater analysis at sampling stations in study area

2 Jul., 2002

St. No	Level	Temp.	Sal.	DO	pH	SD	NH_4-N	NO_2-N	NO_3-N	PO_4-P	Chl.a	POC	DOC
		℃		mg/L		m	μM	μM	μM	μM	μg/L	mgC/m³	mgC/m³
1	S	19.92	32.72	8.47	7.84	5.0	0.500	0.643	1.175	0.355	1.5	-	-
	M	19.33	32.81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	19.13	32.86	8.28	7.50	-	0.929	0.643	2.032	0.452	0.73	-	-
2	S	22.51	32.30	7.21	7.90	5.5	0.500	0.214	0.725	0.290	5.46	-	-
	M	20.95	32.78	-	7.82	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	20.23	32.80	5.19	7.76	-	0.929	0.571	0.814	0.806	1.9	-	-
3	S	21.16	32.42	8.49	7.82	4.0	0.714	0.786	2.468	0.935	2.33	-	-
	M	19.29	32.76	-	7.97	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	18.79	32.83	8.43	7.98	-	1.214	0.857	2.043	1.129	1.56	-	-
4	S	20.54	31.29	8.93	8.08	6.0	0.786	0.286	1.729	0.484	0.61	-	-
	M	19.97	32.65	-	8.06	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	19.31	32.68	8.20	8.05	-	0.571	0.286	0.086	0.323	0.86	-	-
5	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Appendix 2 The results of seawater analysis at sampling stations in study area

29 Jul., 2002

St. No	Level	Temp.	Sal.	DO	pH	SD	NH_4-N	NO_2-N	NO_3-N	PO_4-P	Chl.a	POC	DOC
		℃		mg/L		m	μM	μM	μM	μM	μg/L	mgC/m³	mgC/m³
1	S	23.69	31.87	-	-	6.0	1.15	0.31	1.12	0.33	0.539	630.6	8870.0
	M	21.80	32.16	-	-		0.71	0.23	0.45	0.50	0.539	487.2	4087.0
	B	21.25	32.33	-	-		0.97	0.22	0.35	0.39	0.958	458.1	7276.0
2	S	24.80	31.70	-	-	4.0	0.99	0.25	0.37	0.00	0.116	473.2	3884.0
	M	21.99	32.13	-	-		0.62	0.32	0.93	0.27	0.247	290.3	7340.0
	B	21.58	32.21	-	-		1.20	0.33	1.35	0.33	0.601	448.7	3689.0
3	S	23.26	30.73	-	-	4.0	2.22	0.27	1.23	0.77	0.593	625.2	6020.0
	M	20.95	31.96	-	-		1.21	0.25	0.78	0.06	1.889	481.8	4192.0
	B	20.14	32.19	-	-		1.45	0.31	0.43	0.57	1.560	484.3	5338.0
4	S	22.95	31.74	-	-	7.0	0.88	0.26	0.59	0.01	0.291	320.0	5173.0
	M	22.10	31.83	-	-		1.58	0.24	0.42	1.17	0.386	374.1	3900.0
	B	21.27	31.95	-	-		0.95	0.26	0.26	0.21	0.577	389.4	2736.0
5	S	23.52	31.78	-	-	7.0	1.10	0.25	0.45	0.46	0.546	421.0	3991.0
	M	21.55	32.06	-	-		0.39	0.24	0.34	0.36	1.412	345.5	4810.0
	B	20.87	32.38	-	-		0.83	0.23	0.36	0.26	1.389	356.4	3252.0
6	S	24.66	31.66	-	-	8.0	0.50	0.30	1.01	0.29	0.444	447.2	2964.0
	M	20.95	31.75	-	-		0.80	0.25	0.79	0.82	1.003	455.2	4338.0
	B	20.14	32.07	-	-		1.89	0.24	0.80	0.67	1.008	419.9	2762.0

Appendix 3 The results of seawater analysis at sampling stations in study area

31 Jul., 2002

St. No	Level	Temp.	Sal.	DO	pH	SD	NH_4-N	NO_2-N	NO_3-N	PO_4-P	Chl.a	POC	DOC
		℃		mg/L		m	μM	μM	μM	μM	μg/L	mgC/m³	mgC/m³
1	S	25.8	31.9	6.27	-	6.0	2.38	0.28	1.73	0.26	0.383	1886.8	2346.0
	M	23.6	32.3	4.71	-		0.66	0.24	0.82	0.17	0.055	464.5	4496.0
	B	22.8	32.4	4.1	-		1.10	0.34	0.23	0.21	0.709	453.7	3781.0
2	S	26.6	31.7	6.29	-	4.5	1.48	0.25	0.43	0.32	0.210	512.4	8961.0
	M	22.6	32.2	4.94	-		0.66	0.33	1.00	1.79	0.403	421.6	5145.0
	B	22.5	32.2	4.14	-		0.56	0.33	1.24	0.39	0.646	459.0	5961.0
3	S	24.9	30.8	7.27	-	3.0	0.64	0.23	0.61	0.35	1.255	823.4	55470.0
	M	22.2	32	6.23	-		0.46	0.29	1.05	0.81	2.384	568.9	28480.0
	B	21.1	32.2	5.19	-		1.16	0.30	0.72	0.71	1.964	521.7	4558.0
4	S	24.9	31.8	6.67	-	10.0	0.61	0.24	0.41	0.71	0.085	396.3	9175.0
	M	23.8	31.9	6.81	-		0.71	0.24	0.31	0.63	0.081	514.3	7094.0
	B	22.8	32.00	7.17	-		0.32	0.23	0.29	0.04	0.150	463.2	2624.0
5	S	24.9	31.80	6.89	-	10.0	1.53	0.25	0.58	0.19	0.135	499.9	15840.0
	M	23.7	32.08	6.77	-		0.72	0.24	0.25	0.61	0.301	515.0	3005.0
	B	22.5	32.33	6.32	-		1.82	0.24	0.38	0.29	0.472	554.6	23990.0
6	S	25.6	31.88	6.69	-	10.0	0.57	0.29	1.09	0.00	0.128	558.3	20930.0
	M	22.7	31.90	6.93	-		2.26	0.22	0.24	0.83	0.048	335.4	5398.0
	B	23.6	32.1	6.37	-		1.03	0.25	0.39	0.33	0.719	374.9	3377.0

Appendix 4 The results of seawater analysis at sampling stations in study area

2 Aug., 2002

St. No	Level	Temp.	Sal.	DO	pH	SD	NH_4-N	NO_2-N	NO_3-N	PO_4-P	Chl.a	POC	DOC
		℃		mg/L		m	μM	μM	μM	μM	μg/L	mgC/㎥	mgC/㎥
1	S	24.91	31.89	7.03	8.04	7.0	1.47	0.15	0.68	0.627	1.104	504.0	20640.0
	M	21.88	32.36	7.53	7.99		1.58	0.14	0.31	0.000	1.168	370.9	20700.0
	B	20.74	32.38	6.30	7.90		1.59	0.21	0.48	0.469	1.349	407.1	7870.0
2	S	25.71	31.68	7.00	7.99	3.0	2.73	0.18	0.62	0.120	0.510	386.7	20730.0
	M	22.07	32.23	6.60	7.83		0.89	0.18	0.67	1.213	0.201	288.5	8588.0
	B	21.60	32.21	9.09	7.85		1.98	0.17	0.64	0.837	1.538	320.5	2630.0
3	S	25.24	30.77	7.92	8.03	6.0	1.49	0.24	0.70	0.271	0.102	626.9	9410.0
	M	21.28	31.98	7.72	7.92		1.01	0.20	0.47	0.000	0.929	1156.7	3229.0
	B	20.89	32.23	7.68	7.89		1.05	0.21	0.68	0.528	0.947	650.0	3588.0
4	S	24.33	31.78	7.15	8.07	9.0	1.08	0.16	0.54	0.000	0.050	550.7	33160.0
	M	22.55	31.90	7.46	8.05		0.30	0.15	0.73	0.337	0.330	480.3	27750.0
	B	20.78	32.05	8.00	8.04		0.89	0.15	0.63	0.061	0.243	416.3	42470.0
5	S	24.69	31.82	7.15	8.07	11.0	1.66	0.18	0.58	0.284	1.475	524.1	3855.0
	M	21.65	32.10	7.26	8.01		1.07	0.18	0.88	0.640	0.613	614.1	12620.0
	B	20.80	32.28	7.52	8.03		0.83	0.18	0.57	0.390	1.445	580.6	19050.0
6	S	24.39	31.75	7.62	8.05	8.0	0.84	0.23	1.92	1.957	0.458	439.3	83730.0
	M	22.22	32.05	8.47	8.07		1.22	0.21	0.75	0.758	0.353	530.7	11170.0
	B	20.79	32.09	8.61	8.06		1.09	0.22	0.38	0.107	0.189	556.9	3949.0

Appendix 5 The results of seawater analysis at sampling stations in study area

3 Aug., 2002

St. No	Level	Temp.	Sal.	DO	pH	SD	NH_4-N	NO_2-N	NO_3-N	PO_4-P	Chl.a	POC	DOC
		℃		mg/L		m	μM	μM	μM	μM	μg/L	mgC/m³	mgC/m³
1	S	25.56	31.77	7.09	8.00	9.0	0.72	0.24	0.50	0.15	0.190	282.1	48190.0
	M	22.46	32.22	7.65	7.95		0.36	0.22	0.55	0.04	0.105	451.9	8716.0
	B	20.85	32.43	6.83	7.82		1.40	0.21	0.33	0.79	0.811	501.4	54330.0
2	S	26.57	31.70	6.86	7.96	9.0	0.59	0.20	0.56	0.34	0.346	475.4	40500.0
	M	21.73	32.31	6.75	7.74		0.29	0.21	0.56	0.36	0.519	451.6	4218.0
	B	21.61	32.33	6.39	7.79		0.42	0.22	0.53	0.49	0.617	369.9	16640.0
3	S	25.29	31.64	7.50	8.06	6.5	1.01	0.19	0.52	0.00	0.166	446.7	21130.0
	M	21.34	32.01	7.30	8.00		0.54	0.21	0.30	0.49	0.593	433.5	29360.0
	B	21.12	32.25	7.50	7.94		0.39	0.26	0.39	0.93	0.488	497.8	23570.0
4	S	25.18	31.72	6.99	8.04	10.0	0.95	0.23	0.19	0.88	0.616	447.9	44950.0
	M	21.91	31.89	7.43	8.02		1.14	0.22	0.23	0.67	0.182	368.1	4513.0
	B	20.33	32.17	7.89	7.97		0.33	0.21	0.22	0.90	0.210	368.0	4492.0
5	S	25.20	31.84	6.96	8.04	8.0	1.34	0.21	0.14	0.14	0.032	304.0	4762.0
	M	21.36	32.14	6.99	7.97		0.60	0.22	0.10	0.18	0.001	338.5	38720.0
	B	19.90	32.46	7.44	7.96		0.22	0.21	0.15	2.50	0.001	339.2	9004.0
6	S	24.66	31.78	7.19	8.03	7.0	0.46	0.24	0.06	0.71	0.731	501.8	14710.0
	M	22.63	31.88	7.46	7.99		0.56	0.24	0.41	0.53	0.305	366.4	4076.0
	B	19.64	32.48	5.41	7.79		0.81	0.21	5.82	0.80	0.471	368.1	17670.0

Appendix 6 The results of seawater analysis at sampling stations in study area

4 Aug., 2002

St. No	Level	Temp.	Sal.	DO	pH	SD	NH_4-N	NO_2-N	NO_3-N	PO_4-P	Chl.a	POC	DOC
		℃		mg/L		m	μM	μM	μM	μM	μg/L	mgC/㎥	mgC/㎥
1	S	26.39	31.68	7.27	7.98	8.0	1.20	0.23	1.04	0.94	0.101	363.3	22500.0
	M	22.08	32.30	8.02	7.90		0.89	0.23	0.27	1.43	0.403	343.0	15390.0
	B	21.36	32.36	10.01	7.84		0.45	0.23	0.35	0.46	0.615	350.4	3989.0
2	S	26.12	32.07	7.30	7.93	7.0	0.74	0.24	0.36	0.35	0.207	404.1	33180.0
	M	21.80	32.38	5.42	7.66		0.52	0.22	0.13	0.91	0.376	310.0	5825.0
	B	21.52	32.36	6.26	7.69		0.92	0.25	0.31	1.21	0.841	375.3	15410.0
3	S	25.02	31.48	7.60	8.00	4.5	0.62	0.23	0.21	0.19	0.186	570.3	32150.0
	M	21.55	32.11	7.72	7.97		0.65	0.23	0.58	0.16	0.457	439.4	36600.0
	B	20.94	32.31	12.48	7.96		0.71	0.24	0.34	0.67	2.513	477.0	28390.0
4	S	25.23	31.74	7.04	8.06	10.0	0.67	0.22	0.37	0.17	0.235	368.5	6685.0
	M	22.34	32.02	7.63	8.03		1.71	0.22	1.22	2.43	0.099	582.7	5297.0
	B	19.83	32.48	6.91	7.93		0.97	0.22	0.49	0.76	0.465	456.4	4941.0
5	S	24.44	31.14	7.91	8.06	12.0	0.29	0.24	2.67	0.40	0.069	457.3	35810.0
	M	22.04	32.17	7.12	8.02		0.38	0.22	4.22	0.00	0.742	475.6	6715.0
	B	19.18	32.77	5.94	7.92		0.66	0.22	2.65	0.10	0.254	548.1	5587.0
6	S	24.85	31.78	6.96	8.06	11.0	0.84	0.27	0.77	0.04	0.106	260.3	11195.0
	M	22.00	32.09	7.58	8.02		0.35	0.25	0.26	0.42	0.231	296.2	7636.5
	B	19.91	32.55	5.87	7.87		0.45	0.27	0.28	0.12	0.146	326.1	15895.0

Appendix 7 The results of seawater analysis at sampling stations in study area

5 Aug., 2002

St. No	Level	Temp.	Sal.	DO	pH	SD	NH_4-N	NO_2-N	NO_3-N	PO_4-P	Chl.a	POC	DOC
		℃		mg/L		m	μM	μM	μM	μM	μg/L	mgC/m³	mgC/m³
1	S	25.08	31.82	6.65	7.99	8.0	0.71	0.25	1.04	0.32	0.540	520.9	44170.0
	M	22.43	32.36	6.24	7.89		0.27	0.20	0.22	0.23	1.128	508.5	68345.0
	B	21.36	32.33	5.72	7.85		0.82	0.23	0.98	0.59	0.388	384.5	68565.0
2	S	24.73	31.63	6.88	7.98	5.5	1.10	0.22	0.21	0.36	0.520	545.8	4646.5
	M	22.74	32.19	5.45	7.81		1.44	0.25	0.20	0.34	0.993	582.3	23330.0
	B	21.96	32.26	4.83	7.74		0.42	0.24	0.08	0.61	2.536	432.0	6930.0
3	S	24.63	31.64	6.74	7.98	4.0	0.56	0.23	0.26	0.10	0.733	510.2	48535.0
	M	21.45	32.16	6.80	7.97		0.41	0.24	0.78	0.15	2.501	594.0	8356.5
	B	21.06	32.21	6.73	7.95		0.83	0.23	0.35	0.17	1.263	476.5	12680.0
4	S	25.59	31.68	6.86	8.05	11.0	0.31	0.25	0.43	0.00	0.094	426.7	5233.5
	M	22.49	32.02	7.20	8.02		0.60	0.22	0.32	0.28	0.472	376.9	2458.5
	B	20.30	32.28	7.38	7.99		0.76	0.27	0.43	0.18	0.387	412.7	14520.0
5	S	25.25	31.79	6.85	8.04	10.0	1.07	0.22	1.57	0.27	0.095	295.7	44670.0
	M	22.50	32.25	6.95	7.99		0.62	0.25	0.16	0.26	0.377	441.7	21315.0
	B	19.53	32.67	5.62	7.85		2.00	0.21	0.30	0.12	0.911	298.3	8672.5
6	S	24.79	31.83	8.01	8.11	7.0	1.40	0.21	0.48	0.18	62.95	3790.5	7127.0
	M	21.71	32.05	7.37	8.00		1.39	0.20	0.22	0.00	0.584	485.6	1876.0
	B	19.34	32.54	4.52	7.76		1.95	0.24	0.20	1.38	2.179	602.2	46940.0

Appendix 8 The results of seawater analysis at sampling stations in study area

14 Aug., 2002

St. No	Level	Temp.	Sal.	DO	pH	SD	NH_4-N	NO_2-N	NO_3-N	PO_4-P	Chl.a	POC	DOC
		℃		mg/L		m	μM	μM	μM	μM	μg/L	mgC/m³	mgC/m³
1	S	21.75	28.53	7.75	8.05	4.0	7.18	0.69	11.39	0.34	28.00	1468.3	-
	M	21.36	30.48	6.91	7.91		4.81	0.83	9.78	0.49	5.20	428.5	-
	B	20.74	31.94	6.52	7.79		3.93	0.92	8.60	0.35	17.80	446.5	-
2	S	23.39	30.12	6.85	7.95	2.5	0.68	0.88	6.04	0.55	13.20	468.6	-
	M	21.94	31.50	5.66	7.90		2.94	1.32	4.85	0.92	5.80	389.5	-
	B	21.48	31.80	6.01	7.90		4.54	1.33	5.37	0.63	6.00	289.8	-
3	S	22.09	27.79	6.57	8.00	3.0	4.31	1.45	9.48	0.83	6.40	366.5	-
	M	21.67	31.37	5.87	7.98		1.17	1.25	5.35	0.97	4.80	351.9	-
	B	20.71	32.20	5.66	7.93		1.85	1.56	5.13	1.13	8.30	342.2	-
4	S	21.96	30.19	7.93	8.11	4.0	5.69	0.68	5.77	0.92	11.90	1723.3	-
	M	22.10	31.26	7.28	8.06		3.20	0.74	2.51	0.46	5.60	370.5	-
	B	20.24	32.14	7.93	8.02		3.32	0.74	2.22	0.52	4.50	354.8	-
5	S	21.50	27.86	7.16	8.07	6.0	6.06	0.89	16.68	0.73	6.80	585.1	-
	M	21.76	28.96	7.14	8.07		3.54	0.86	14.80	1.00	4.80	240.4	-
	B	19.74	32.37	7.24	8.01		4.74	0.83	15.04	0.80	4.80	255.4	-
6	S	22.23	27.86	6.95	8.01	3.0	5.10	1.64	11.23	0.97	9.20	640.3	-
	M	22.00	30.43	6.61	8.04		0.52	1.35	6.27	0.77	4.40	295.0	-
	B	20.72	31.95	6.64	8.00		3.06	1.29	5.41	0.85	4.10	299.7	-

Appendix 9 The results of seawater analysis at sampling stations in study area

28 Aug., 2002

St. No	Level	Temp.	Sal.	DO	pH	SD	NH_4-N	NO_2-N	NO_3-N	PO_4-P	Chl.a	POC	DOC
		℃		mg/L		m	μM	μM	μM	μM	μg/L	mgC/m³	mgC/m³
1	S	26.15	28.64	8.14	8.10	2.5	5.72	2.12	4.88	0.35	9.60	833.3	-
	M	23.24	29.77	6.30	7.88		4.96	1.49	3.78	0.68	3.80	492.9	-
	B	21.43	31.27	8.48	7.71		3.66	1.61	3.49	0.44	4.30	491.0	-
2	S	25.51	28.23	7.99	8.11	3.3	3.19	1.14	3.60	0.34	10.40	775.7	-
	M	23.04	30.14	6.20	7.96		7.86	1.54	2.30	0.67	4.20	420.2	-
	B	22.97	30.31	7.61	8.00		6.48	1.55	2.02	0.91	10.50	452.2	-
3	S	26.15	28.47	7.47	8.07	4.2	4.26	1.93	3.36	0.75	4.80	498.6	-
	M	23.36	29.70	7.21	8.02		3.86	1.98	2.42	0.87	3.60	506.5	-
	B	21.86	31.20	5.51	7.90		5.00	2.17	2.45	0.92	3.80	369.5	-
4	S	26.10	29.82	16.72	8.55	6.0	0.78	0.72	0.41	0.92	97.40	743.9	-
	M	24.19	30.82	8.59	8.15		2.65	0.66	0.06	0.58	3.40	1508.6	-
	B	19.01	32.40	5.58	7.77		1.99	0.69	0.28	0.65	3.60	3502.0	-
5	S	25.05	29.32	10.60	8.30	1.0	2.43	0.92	0.07	0.38	18.00	639.9	-
	M	22.81	30.82	6.60	7.96		3.59	0.77	0.27	0.38	3.70	1193.3	-
	B	17.82	32.89	5.58	7.75		0.72	1.03	1.82	0.69	3.20	404.0	-
6	S	25.61	28.75	8.89	8.17	5.0	3.14	1.27	2.19	0.87	5.30	564.7	-
	M	24.37	30.47	9.23	8.19		1.39	0.96	0.57	0.65	4.00	471.9	-
	B	20.07	32.20	5.04	7.74		2.57	0.79	0.22	0.75	3.50	439.0	-

Appendix 10 The results of phytoplankton cell counting at sampling stations in study area

	St. 1		St. 2		St. 3	
	Species	cells/mL	Species	cells/mL	Species	cells/mL
02-Jul	*Chaetoceros* spp.	7	*Chaetoceros* spp.	68	*Asterionella* sp.	1
	Skeletonema costatum	4	*Nitzchia* sp.	6	*Chaetoceros* spp.	13
	Ceratium furca	2	*Thalassiosira* sp.	4	*Eucampia zodiacus*	2
	Distephanus sp.	2			*Ceratium furca*	2
	Prorocentrum micans	2			*Prorocentrum triestinum*	2
29-Jul	*Chaetoceros affine*	2	*Chaetoceros compressum*	2	*Chaetoceros affine*	4
	Ch. compressum	7	*Ch. distans*	5	*Ch. didymus*	9
	Ch. distans	7	*Ch.* spp.	99	*Ch. distans*	2
	Ch. spp.	86	*Ch. lorenzianus*	8	*Ch.* spp.	250
	Fragilaria spp.	2	*Leptocylindrus danicus*	5	*Ch. lorenzianus*	2
	Rhzosolenia fragilissima	2	*Nitzchia* spp.	4	*Guinardia floccida*	1
	Rh. spp.	2	*Rh. setigera*	2	*Leptocylindrus danicus*	6
	Thalassionema nitzschioides	6	*Skeletonema costatum*	134	*Nitzchia* spp.	7
	Thalassiothrix frauenfeldii	2	*Thalassionema nitzschioides*	10	*Pleurosigma* spp.	2
	Alexandrium spp.	1	*Thalassiothrix frauenfeldii*	20	*Skeletonema costatum*	98
	Gymnodinium spp.	2	*Ceratium furca*	2	*Thalassionema nitzschioides*	10
	Prorecentrum micans	2	*Ceratium fusus*	2	*Thalassiothrix frauenfeldii*	4
	Proro. spp.	1	*Ditylum brightwellii*	10	*Alexandrium* spp.	1
			Distaphanus speculum	2	*Distaphanus speculum*	1
			Prorocentrum minimum	2	*Gyrodinium* spp.	1
					Gonyaulax spp.	1
31-Jul	*Bacteriastrum* spp.	1	*Ch. paradoxum*	2	*Ch.* spp.	4
	Ch. compressum	7	*Ch.* spp.	28	*Eutreptiella gymnastica*	2
	Ch. spp.	6	*Coscinodiscus* spp.	1	*Navicula* spp.	2
	Fragilaria spp.	1	*Leptocylindrus* spp.	3	*Thalassionema nitzschioides*	4
	Guinardia floccida	1	*Nitzchia spp.*	9		
	Thalassionema nitzschioides	2	*Rhizosolenia indica*	1		
	Thalassiosira rotula	1	*Rh. setigera*	1		
	Thalassiothrix frauenfeldii	2	*Skeletonema costatum*	66		
	Gonyaulax spp.	1	*Thalassionema nitzschioides*	8		
			Thalassiothrix frauenfeldii	2		
			Ceratium furca			
			Ditylum brightwellii	1		

Appendix 11 The results of phytoplankton cell counting at sampling stations in study area

	St. 1		St. 2		St. 3	
	Species	cells/mL	Species	cells/mL	Species	cells/mL
02-Aug	*Ch. didymus*	3	*Ch.* spp.	6	*Ch.* spp.	84
	Ch. lorenzianus	2	*Coscinodiscus* spp.	1	*Guinardia floccida*	1
	Ch. spp.	66	*Leptocylindrus* spp.	2	*Nitzchia* spp.	4
	Thalassiothrix frauenfeldii	3	*Rh. storterforthii*	1	*Rh. storterforthii*	2
	Ceratium tripos	1	*Skeletonema costatum*	27	*Skeletonema costatum*	147
	Gymnodinium spp.	1	*Thalassiothrix frauenfeldii*	1	*Thalassionema nitzschioides*	11
	Prorocentrum triestinum	1	*Ceratium furca*	1	*Thalassiothrix frauenfeldii*	12
			Ditylum brightwellii	1	*Ceratium furca*	2
			Gymnodinium spp.	1	*Ceratium tripos*	1
			Prorocentrum triestinum	1	*Gymnodinium* spp.	3
			Scrippsiella trochoidea	1	*Protoperidium* spp.	1
03-Aug	*Ch.* spp.	54	*Chaetoceros affine*		*Ch.* spp.	155
	Guinardia floccida	2	*Bacteriastrum* spp.	1	*Guinardia floccida*	3
	Leptocylindrus danicus	5	*Ch.* spp.	122	*Nitzchia* spp.	43
	Skeletonema costatum	21	*Licmophora sp.*	1	*Rh. setigera*	1
	Thalassionema nitzschioides	6	*Nitzchia* spp.	2	*Rh. storterforthii*	3
	Gymnodinium spp.	2	*Skeletonema costatum*	14	*Skeletonema costatum*	70
			Thalassionema nitzschioides	6	*Thalassiothrix frauenfeldii*	10
			Ceratium tripos	1	*Distaphanus speculum*	1
			Heterocapsa triestium	1		
			Gymnodinium spp.	2		
04-Aug	*Chaetoceros* spp.	67	*Chaetoceros* spp.	172	*Bacteriastrum* spp.	1
	Guinardia floccida	5	*Guinardia floccida*	1	*Ch.* spp.	2
	Leptocylindrus danicus	2	*Thalassiothrix frauenfeldii*	2	*Cylindotheca closterium*	1
	Nitzchia spp.	1			*Skeletonema costatum*	305
	Skeletonema costatum	6			*Thalassiosira rotula*	2
	Thalassiothrix frauenfeldii	3			*Ceratium fusus*	1

Appendix 12 The results of phytoplankton cell counting at sampling stations in study area

	St. 1		St. 2		St. 3	
	Species	cells/mL	Species	cells/mL	Species	cells/mL
05-Aug	*Ch. didymus*	1	*Ch.* spp.	115	*Ch.* spp.	14
	Ch. spp.	56	*Guinardia floccida*	1	*Leptocylindrus danicus*	8
	Cylindotheca closterium	1	*Leptocylindrus* spp.	7	*Skeletonema costatum*	12
	Leptocylindrus spp.	2	*Nitzchia* spp.	6	*Thalassiothrix frauenfeldii*	1
	Nitzchia spp.	2	*Skeletonema costatum*	14	*Alexandrium* spp.	1
	Thalassiothrix frauenfeldii	6	*Thalassiothrix frauenfeldii*	11	*Ceratium tripos*	1
	Ceratium fusus	1	*Ceratium fusus*	1		
	Proro. spp.	3	*Gonyaulax spp.*	1		
			Proro. triestinum	12		
			Protoperidium bipes	1		
14-Aug	*Rh. fragilissima*	4	*Ch. danicum*	2	*Cerataulina spp.*	1
	Skeletonema costatum	14	*Nitzchia* spp.	2	*Leptocylindrus* spp.	2
	Alexandrium spp.	3	*Skeletonema costatum*	14	*Nitzchia* spp.	3
	Ceratium furca	1	*Thalassionema nitzschioides*	2	*Skeletonema costatum*	14
	Cochlodinium polykrikoides	296	*Thalassiosira decipiens*	1	*Thalassiosira rotula*	1
	Distaphanus speculum	2	*Thalassiothrix frauenfeldii*	17	*Thalassiothrix frauenfeldii*	3
	Dinophysis fortii	1	*Alexandrium* spp.	2	*Alexandrium* spp.	2
	Gymnodinium spp.	3	*Cochlodinium polykrikoides*	53	*Distaphanus speculum*	4
			Dinophysis fortii	1		
			Gymnodinium spp.	1		
29-Aug	*Ch. danicum*	1	*Ch.* spp.	11	*Ch.* spp.	1
	Ch. spp.	17	*Cylindotheca closterium*	1	*Nitzchia* spp.	2
	Coscinodiscus spp.	1	*Eucampia zodiacus*	1	*Thalassiosira decipiens*	1
	Cylindotheca closterium	1	*Leptocylindrus* spp.	3	*Cochlodinium polykrikoides*	10
	Leptocylindrus spp.	2	*Navicula* spp.	1	*Scrippsiella trochoidea*	1
	Navicula spp.	1	*Nitzchia spp.*	6		
	Nitzchia spp.	21	*Rh. fragilissima*	3		
	Rh. fragilissima	1	*Thalassiosira decipiens*	9		
	Thalassiosira decipiens	3	*Cochlodinium polykrikoides*	25		
	Cochlodinium polykrikoides	16	*Noctilica scintillans*	1		

Appendix 13 The results of phytoplankton cell counting at sampling stations in study area

	St. 4		St. 5		St. 6	
	Species	cells/mL	Species	cells/mL	Species	cells/mL
02-Jul	*Asterionella sp.*	2				
	Chaetoceros spp.	162				
	Ditylum sp.	3				
	Eucampia zodiacus	2				
	Nitzchia sp.	5				
	Rhizosolenia sp.	2				
	Skeletonema costatum	20				
	Thalassiosira sp.	3				
29-Jul	*Chaetoceros affine*	2	*Chaetoceros affine*	5	*Chaetoceros affine*	3
	Ch. spp.	24	*Ch.* spp.	15	*Ch. danicum*	5
	Coscinodiscus spp.	1	*Nitzchia* spp.	2	*Ch. distans*	6
	Fragilaria spp.	1	*Thalassionema nitzschioides*	4	*Ch.* spp.	33
	Guinardia floccida	2	*Thalassiothrix frauenfeldii*	4	*Leptocylindrus* spp.	7
	Nitzchia spp.	4	*Akashiwo sanguinea*	1	*Skeletonema costatum*	37
	Rhizosolenia indica	1	*Gymnodinium* spp.	2	*Thalassionema nitzschioides*	2
	Rh. setigera	2	*Gonyaulax* spp.	1	*Thalassiothrix frauenfeldii*	3
	Skeletonema costatum	42	*Katodinium glaucum*	3	*Ditylum brightwellii*	2
	Thalassionema nitzschioides	4	*Scrippsiella trochoidea*	1		
	Thalassiothrix frauenfeldii	16				
	Ceratium fusus	1				
	Dictyocha filula	2				
	Gymnodinium spp.	1				
	Gonyaulax spp.	2				
	Katodinium glaucum	2				
	Prorecentrum micans	1				
	Protoperidium spp.	1				
	Scrippsiella trochoidea	4				
31-Jul	*Ch. didymus*	2	*Ch.* spp.	62	*Ch. distans*	5
	Ch. spp.	31	*Thalassionema nitzschioides*	1	*Ditylum brightwellii*	1
	Nitzchia spp.	10	*Ceratium furca*		*Katodinium glaucum*	1
	Skeletonema costatum	38	*Gymnodinium* spp.	2	*Proro. triestinum*	1
	Thalassionema nitzschioides	7	*Gonyaulax* spp.	2	*Scrippsiella trochoidea*	2
	Thalassiothrix frauenfeldii	2	*Proro. triestinum*	6		
	Ceratium furca	1	*Scrippsiella trochoidea*	2		
	Prorocentrum minimum	1				
	Proro. triestinum	2				
	Scrippsiella trochoidea	2				

Appendix 14 The results of phytoplankton cell counting at sampling stations in study area

	St. 4		St. 5		St. 6	
	Species	cells/mL	Species	cells/mL	Species	cells/mL
02-Aug	*Ch.* spp.	2	*Ch. didymus*	2	*Leptocylindrus* spp.	2
	Navicula spp.	2	*Ch.* spp.	51	*Nitzchia* spp.	4
	Thalassionema nitzschioides	1	*Alexandrium* spp.	1	*Rh.spp.*	1
	Ceratium fusus	1	*Ceratium tripos*	1	*Thalassiothrix frauenfeldii*	3
	Dictyocha fibula	1	*Prorecentrum dentatum*	1	*Dictyocha fibula*	1
	Katodinium glaucum	1	*Protoperidium* spp.	1	*Distaphanus speculum*	1
	Proro. spp.	1			*Prorocentrum spp.*	6
					Scrippsiella trochoidea	1
03-Aug	*Nitzchia* spp.	2	*Chaetoceros affine*		*Ch.* spp.	21
	Cochlodinium polykrikoides	8	*Ch.* spp.	5	*Cylindotheca closterium*	1
	Noctilica scintillans	1	*Leptocylindrus danicus*	4	*Leptocylindrus* spp.	5
			Navicula spp.	1	*Skeletonema costatum*	7
			Skeletonema costatum	4	*Thalassiosira decipiens*	2
			Thalassiothrix frauenfeldii	1	*Ceratium fusus*	1
			Ceratium furca	1	*Cochlodinium polykrikoides*	10
			Proro. spp.	2	*Scrippsiella trochoidea*	1
04-Aug	*Chaetoceros* spp.	38	*Chaetoceros spp.*	65	*Chaetoceros didymus*	14
	Skeletonema costatum	14	*Guinardia floccida*	2	*Ch.* spp.	338
	Thalassiosira decipiens	1	*Leptocylindrus danicus*	5	*Eucampia zodiacus*	1
	Thalassionema nitzschioides	2	*Nitzchia* spp.	8	*Guinardia floccida*	1
			Rh. fragilissima	2	*Leptocylindrus* spp.	15
			Rh. setigera	1	*Nitzchia* spp.	10
			Skeletonema costatum	24	*Skeletonema costatum*	159
			Thalassiosira decipiens	1	*Thalassiothrix frauenfeldii*	10
			Thalassionema nitzschioides	2	*Distaphanus speculum*	1
			Noctilica scintillans	1	*Gymnodinium* spp.	1
					Katodinium glaucum	1
					Protoperidium bipes	2
					Scrippsiella trochoidea	1

Appendix 15 The results of phytoplankton cell counting at sampling stations in study area

	St. 4		St. 5		St. 6	
	Species	cells/mL	Species	cells/mL	Species	cells/mL
05-Aug	*Ch.* spp.	2	*Ch.* spp.	6	*Cochlodinium polykrikoides*	580
	Leptocylindrus spp.	3				
	Ceratium furca	1				
	Gymnodinium spp.	1				
14-Aug	*Ch.* spp.	1	*Ch.* spp.	9	*Ch.* spp.	9
	Guinardia floccida	2	*Nitzchia* spp.	3	*Rh. setigera*	1
	Rh. setigera	1	*Skeletonema costatum*	6	*Skeletonema costatum*	8
	Skeletonema costatum	9	*Alexandrium* spp.	4	*Thalassionema nitzschioides*	1
	Thalassionema nitzschioides	1	*Ceratium fusus*	3	*Alexandrium* spp.	20
	Alexandrium spp.	6	*Distaphanus speculum*	1	*Ceratium tripos*	1
	Ceratium furca	1	*Katodinium glaucum*	1		
	Ceratium fusus	1				
	Ceratium tripos	2				
	Cochlodinium polykrikoides	3200				
	Distaphanus speculum	2				
29-Aug	*Ch.* spp.	2	*Ch.* spp.	8	*Ch.* spp.	8
	Nitzchia spp.	19	*Skeletonema costatum*	5	*Nitzchia* spp.	9
	Rhizosolenia indica	1	*Thalassiosira decipiens*	1	*Rh. setigera*	1
	Rh. setigera	5	*Ceratium tripos*	2	*Skeletonema costatum*	10
	Ceratium furca	1	*Cochlodinium polykrikoides*	396	*Thalassiosira decipiens*	1
	Cochlodinium polykrikoides	142	*Dinophysis fortii*	1	*Thalassiothrix frauenfeldii*	5
	Noctilica scintillans	9	*Noctilica scintillans*	1		
			Scrippsiella trochoidea	2		

Appendix 16 The boundary condition of ecosystem model for each compartments(Level=1)

	BD	P	SQN	SQP	Z	POC	DOC	PO_4-P	NH_4-N	NO_2-N	NO_3-N	DO	COD
		mgC/m³			mgC/m³	mgC/m³	mgC/m³	μM	μM	μM	μM	mg/L	mg/L
29-Jul	1	1449.2	6.3	12.9	500.0	625.2	6020	0.77	2.22	0.27	1.23	7.27	1
		1449.2	6.3	12.9	500.0	625.2	6020	0.77	2.22	0.27	1.23	7.27	1
30-Jul		1449.2	6.3	12.9	500.0	625.2	6020	0.77	2.22	0.27	1.23	7.27	1
		1449.2	6.3	12.9	500.0	625.2	6020	0.77	2.22	0.27	1.23	7.27	1
31-Jul		3066.9	6.3	12.9	500.0	823.4	55470	0.35	0.64	0.23	0.61	7.27	1
		3066.9	6.3	12.9	500.0	823.4	55470	0.35	0.64	0.23	0.61	7.27	1
1-Aug		249.3	6.3	12.9	500.0	626.9	9410	0.271	1.49	0.24	0.7	7.92	1
		249.3	6.3	12.9	500.0	626.9	9410	0.271	1.49	0.24	0.7	7.92	1
2-Aug		249.3	6.3	12.9	500.0	626.9	9410	0.271	1.49	0.24	0.7	7.92	1
		249.3	6.3	12.9	500.0	626.9	9410	0.271	1.49	0.24	0.7	7.92	1
3-Aug		405.7	5.0	8.0	500.0	446.7	21130	0.01	1.01	0.19	0.52	7.5	1
		405.7	5.0	8.0	500.0	446.7	21130	0.01	1.01	0.19	0.52	7.5	1
4-Aug		454.5	3.2	6.5	500.0	570.3	32150	0.19	0.62	0.23	0.21	7.6	1
		454.5	3.2	6.5	500.0	570.3	32150	0.19	0.62	0.23	0.21	7.6	1
5-Aug		1791.3	3.2	6.5	500.0	510.2	48535	0.1	0.56	0.23	0.26	6.74	1
		1791.3	3.2	6.5	500.0	510.2	48535	0.1	0.56	0.23	0.26	6.74	1
29-Jul	2	1449.2	6.3	12.9	500.0	625.2	6020	0.77	2.22	0.27	1.23	7.27	1
		1449.2	6.3	12.9	500.0	625.2	6020	0.77	2.22	0.27	1.23	7.27	1
30-Jul		1449.2	6.3	12.9	500.0	625.2	6020	0.77	2.22	0.27	1.23	7.27	1
		1449.2	6.3	12.9	500.0	625.2	6020	0.77	2.22	0.27	1.23	7.27	1
31-Jul		3066.9	6.3	12.9	500.0	823.4	55470	0.35	0.64	0.23	0.61	7.27	1
		3066.9	6.3	12.9	500.0	823.4	55470	0.35	0.64	0.23	0.61	7.27	1
1-Aug		249.3	6.3	12.9	500.0	626.9	9410	0.271	1.49	0.24	0.7	7.92	1
		249.3	6.3	12.9	500.0	626.9	9410	0.271	1.49	0.24	0.7	7.92	1
2-Aug		249.3	6.3	12.9	500.0	626.9	9410	0.271	1.49	0.24	0.7	7.92	1
		249.3	6.3	12.9	500.0	626.9	9410	0.271	1.49	0.24	0.7	7.92	1
3-Aug		405.7	5.0	8.0	500.0	446.7	21130	0.01	1.01	0.19	0.52	7.5	1
		405.7	5.0	8.0	500.0	446.7	21130	0.01	1.01	0.19	0.52	7.5	1
4-Aug		454.5	3.2	6.5	500.0	570.3	32150	0.19	0.62	0.23	0.21	7.6	1
		454.5	3.2	6.5	500.0	570.3	32150	0.19	0.62	0.23	0.21	7.6	1
5-Aug		1791.3	3.2	6.5	500.0	510.2	48535	0.1	0.56	0.23	0.26	6.74	1
		1791.3	3.2	6.5	500.0	510.2	48535	0.1	0.56	0.23	0.26	6.74	1
29-Jul	3	1085.0	6.3	12.9	500.0	447.2	2964	0.29	0.5	0.3	1.01	6.69	1
		1085.0	6.3	12.9	500.0	447.2	2964	0.29	0.5	0.3	1.01	6.69	1
30-Jul		312.8	6.3	12.9	500.0	558.3	20930	0.01	0.57	0.29	1.09	6.69	1
		312.8	6.3	12.9	500.0	558.3	20930	0.01	0.57	0.29	1.09	6.69	1
31-Jul		312.8	6.3	12.9	500.0	558.3	20930	0.01	0.57	0.29	1.09	6.69	1
		312.8	6.3	12.9	500.0	558.3	20930	0.01	0.57	0.29	1.09	6.69	1
1-Aug		312.8	6.3	12.9	500.0	558.3	20930	0.01	0.57	0.29	1.09	6.69	1
		312.8	6.3	12.9	500.0	558.3	20930	0.01	0.57	0.29	1.09	6.69	1
2-Aug		1119.3	6.3	12.9	500.0	439.3	83730	1.957	0.84	0.23	1.92	7.62	1
		1119.3	6.3	12.9	500.0	439.3	83730	1.957	0.84	0.23	1.92	7.62	1
3-Aug		1786.4	5.0	8.0	500.0	501.8	14710	0.71	0.46	0.24	0.06	7.19	1
		1786.4	5.0	8.0	500.0	501.8	14710	0.71	0.46	0.24	0.06	7.19	1
4-Aug		259.0	3.2	6.5	500.0	260.3	11195	0.04	0.84	0.27	0.77	6.96	1
		259.0	3.2	6.5	500.0	260.3	11195	0.04	0.84	0.27	0.77	6.96	1
5-Aug		153836.0	3.2	6.5	500.0	3790.5	7127	0.18	1.4	0.21	0.48	8.01	1
		153836.0	3.2	6.5	500.0	3790.5	7127	0.18	1.4	0.21	0.48	8.01	1

Appendix 16 The boundary condition of ecosystem model for each compartments(Level=1 continued)

	BD	P	SQN	SQP	Z	POC	DOC	PO_4-P	NH_4-N	NO_2-N	NO_3-N	DO	COD
		mgC/m³			mgC/m³	mgC/m³	mgC/m³	μM	μM	μM	μM	mg/L	mg/L
29-Jul	4	1334.3	6.3	12.9	500.0	421	3991	0.46	1.1	0.25	0.45	6.89	1
		1334.3	6.3	12.9	500.0	421	3991	0.46	1.1	0.25	0.45	6.89	1
30-Jul		329.9	6.3	12.9	500.0	499.9	15840	0.19	1.53	0.25	0.58	6.89	1
		329.9	6.3	12.9	500.0	499.9	15840	0.19	1.53	0.25	0.58	6.89	1
31-Jul		329.9	6.3	12.9	500.0	499.9	15840	0.19	1.53	0.25	0.58	6.89	1
		329.9	6.3	12.9	500.0	499.9	15840	0.19	1.53	0.25	0.58	6.89	1
1-Aug		329.9	6.3	12.9	500.0	499.9	15840	0.19	1.53	0.25	0.58	6.89	1
		329.9	6.3	12.9	500.0	499.9	15840	0.19	1.53	0.25	0.58	6.89	1
2-Aug		3604.6	6.3	12.9	500.0	524.1	3855	0.284	1.66	0.18	0.58	7.15	1
		3604.6	6.3	12.9	500.0	524.1	3855	0.284	1.66	0.18	0.58	7.15	1
3-Aug		78.2	5.0	8.0	500.0	304	4762	0.14	1.34	0.21	0.14	6.96	1
		78.2	5.0	8.0	500.0	304	4762	0.14	1.34	0.21	0.14	6.96	1
4-Aug		168.6	3.2	6.5	500.0	457.3	35810	0.4	0.29	0.24	2.67	7.91	1
		168.6	3.2	6.5	500.0	457.3	35810	0.4	0.29	0.24	2.67	7.91	1
5-Aug		232.2	3.2	6.5	500.0	295.7	44670	0.27	1.07	0.22	1.57	6.85	1
		232.2	3.2	6.5	500.0	295.7	44670	0.27	1.07	0.22	1.57	6.85	1
29-Jul	5	1317.2	6.3	12.9	500.0	630.6	8870	0.33	1.15	0.31	1.12	6.27	1
		1317.2	6.3	12.9	500.0	630.6	8870	0.33	1.15	0.31	1.12	6.27	1
30-Jul		1317.2	6.3	12.9	500.0	1886.8	2346	0.26	2.38	0.28	1.73	6.27	1
		1317.2	6.3	12.9	500.0	1886.8	2346	0.26	2.38	0.28	1.73	6.27	1
31-Jul		936.0	6.3	12.9	500.0	1886.8	2346	0.26	2.38	0.28	1.73	6.27	1
		936.0	6.3	12.9	500.0	1886.8	2346	0.26	2.38	0.28	1.73	6.27	1
1-Aug		936.0	6.3	12.9	500.0	1886.8	2346	0.26	2.38	0.28	1.73	6.27	1
		936.0	6.3	12.9	500.0	1886.8	2346	0.26	2.38	0.28	1.73	6.27	1
2-Aug		2697.9	6.3	12.9	500.0	504	20640	0.627	1.47	0.15	0.68	7.03	1
		2697.9	6.3	12.9	500.0	504	20640	0.627	1.47	0.15	0.68	7.03	1
3-Aug		464.3	5.0	8.0	500.0	282.1	48190	0.15	0.72	0.24	0.5	7.09	1
		464.3	5.0	8.0	500.0	282.1	48190	0.15	0.72	0.24	0.5	7.09	1
4-Aug		246.8	3.2	6.5	500.0	363.3	22500	0.94	1.2	0.23	1.04	7.27	1
		246.8	3.2	6.5	500.0	363.3	22500	0.94	1.2	0.23	1.04	7.27	1
5-Aug		1319.6	3.2	6.5	500.0	520.9	44170	0.32	0.71	0.25	1.04	6.65	1
		1319.6	3.2	6.5	500.0	520.9	44170	0.32	0.71	0.25	1.04	6.65	1

Appendix 17 The boundary condition of ecosystem model for each compartments(Level=2)

	BD	P	SQN	SQP	Z	POC	DOC	PO4	NH4	NO2	NO3	DO	COD
		mgC/m³			mgC/m³	mgC/m³	mgC/m³	μM	μM	μM	μM	mg/L	
29-Jul	1	4616.3	6.3	12.9	500.0	481.8	4192	0.06	1.21	0.25	0.78	6.23	1
		4616.3	6.3	12.9	500.0	481.8	4192	0.06	1.21	0.25	0.78	6.23	1
30-Jul		7060.1	6.3	12.9	500.0	481.8	4192	0.06	1.21	0.25	0.78	6.23	1
		7060.1	6.3	12.9	500.0	481.8	4192	0.06	1.21	0.25	0.78	6.23	1
31-Jul		5826.0	6.3	12.9	500.0	568.9	28480	0.81	0.46	0.29	1.05	6.23	1
		5826.0	6.3	12.9	500.0	568.9	28480	0.81	0.46	0.29	1.05	6.23	1
1-Aug		8269.8	6.3	12.9	500.0	568.9	28480	0.81	0.46	0.29	1.05	7.72	1
		8269.8	6.3	12.9	500.0	568.9	28480	0.81	0.46	0.29	1.05	7.72	1
2-Aug		2270.3	6.3	12.9	500.0	1156.7	3229	0.01	1.01	0.2	0.47	7.72	1
		2270.3	6.3	12.9	500.0	1156.7	3229	0.01	1.01	0.2	0.47	7.72	1
3-Aug		1449.2	5.0	8.0	500.0	433.5	29360	0.49	0.54	0.21	0.3	7.3	1
		1449.2	5.0	8.0	500.0	433.5	29360	0.49	0.54	0.21	0.3	7.3	1
4-Aug		1116.8	3.2	6.5	500.0	439.4	36600	0.16	0.65	0.23	0.58	7.72	1
		1116.8	3.2	6.5	500.0	439.4	36600	0.16	0.65	0.23	0.58	7.72	1
5-Aug		6111.9	3.2	6.5	500.0	594	8356.5	0.15	0.41	0.24	0.78	6.8	1
		6111.9	3.2	6.5	500.0	594	8356.5	0.15	0.41	0.24	0.78	6.8	1
29-Jul	2	4616.3	6.3	12.9	500.0	481.8	4192	0.06	1.21	0.25	0.78	6.23	1
		4616.3	6.3	12.9	500.0	481.8	4192	0.06	1.21	0.25	0.78	6.23	1
30-Jul		7060.1	6.3	12.9	500.0	481.8	4192	0.06	1.21	0.25	0.78	6.23	1
		7060.1	6.3	12.9	500.0	481.8	4192	0.06	1.21	0.25	0.78	6.23	1
31-Jul		5826.0	6.3	12.9	500.0	568.9	28480	0.81	0.46	0.29	1.05	6.23	1
		5826.0	6.3	12.9	500.0	568.9	28480	0.81	0.46	0.29	1.05	6.23	1
1-Aug		8269.8	6.3	12.9	500.0	568.9	28480	0.81	0.46	0.29	1.05	7.72	1
		8269.8	6.3	12.9	500.0	568.9	28480	0.81	0.46	0.29	1.05	7.72	1
2-Aug		2270.3	6.3	12.9	500.0	1156.7	3229	0.01	1.01	0.2	0.47	7.72	1
		2270.3	6.3	12.9	500.0	1156.7	3229	0.01	1.01	0.2	0.47	7.72	1
3-Aug		1449.2	5.0	8.0	500.0	433.5	29360	0.49	0.54	0.21	0.3	7.3	1
		1449.2	5.0	8.0	500.0	433.5	29360	0.49	0.54	0.21	0.3	7.3	1
4-Aug		1116.8	3.2	6.5	500.0	439.4	36600	0.16	0.65	0.23	0.58	7.72	1
		1116.8	3.2	6.5	500.0	439.4	36600	0.16	0.65	0.23	0.58	7.72	1
5-Aug		6111.9	3.2	6.5	500.0	594	8356.5	0.15	0.41	0.24	0.78	6.8	1
		6111.9	3.2	6.5	500.0	594	8356.5	0.15	0.41	0.24	0.78	6.8	1
29-Jul	3	2451.1	6.3	12.9	500.0	455.2	4338	0.82	0.8	0.25	0.79	6.93	1
		2451.1	6.3	12.9	500.0	455.2	4338	0.82	0.8	0.25	0.79	6.93	1
30-Jul		117.3	6.3	12.9	500.0	335.4	5398	0.83	2.26	0.22	0.24	6.93	1
		117.3	6.3	12.9	500.0	335.4	5398	0.83	2.26	0.22	0.24	6.93	1
31-Jul		117.3	6.3	12.9	500.0	335.4	5398	0.83	2.26	0.22	0.24	6.93	1
		117.3	6.3	12.9	500.0	335.4	5398	0.83	2.26	0.22	0.24	6.93	1
1-Aug		117.3	6.3	12.9	500.0	335.4	5398	0.83	2.26	0.22	0.24	6.93	1
		117.3	6.3	12.9	500.0	335.4	5398	0.83	2.26	0.22	0.24	6.93	1
2-Aug		862.7	6.3	12.9	500.0	530.7	11170	0.758	1.22	0.21	0.75	8.47	1
		862.7	6.3	12.9	500.0	530.7	11170	0.758	1.22	0.21	0.75	8.47	1
3-Aug		745.4	5.0	8.0	500.0	366.4	4076	0.53	0.56	0.24	0.41	7.46	1
		745.4	5.0	8.0	500.0	366.4	4076	0.53	0.56	0.24	0.41	7.46	1
4-Aug		564.5	3.2	6.5	500.0	296.2	7636.5	0.42	0.35	0.25	0.26	7.58	1
		564.5	3.2	6.5	500.0	296.2	7636.5	0.42	0.35	0.25	0.26	7.58	1
5-Aug		1427.2	3.2	6.5	500.0	485.6	1876	0.01	1.39	0.2	0.22	7.37	1
		1427.2	3.2	6.5	500.0	485.6	1876	0.01	1.39	0.2	0.22	7.37	1

Appendix 17 The boundary condition of ecosystem model for each compartments(Level=2 continued)

	BD	P	SQN	SQP	Z	POC	DOC	PO4	NH4	NO2	NO3	DO	COD
		mgC/m³			mgC/m³	mgC/m³	mgC/m³	μM	μM	μM	μM	mg/L	
29-Jul	4	3450.6	6.3	12.9	500.0	345.5	4810	0.36	0.39	0.24	0.34	6.77	1
		3450.6	6.3	12.9	500.0	345.5	4810	0.36	0.39	0.24	0.34	6.77	1
30-Jul		735.6	6.3	12.9	500.0	515	3005	0.61	0.72	0.24	0.25	6.77	1
		735.6	6.3	12.9	500.0	515	3005	0.61	0.72	0.24	0.25	6.77	1
31-Jul		735.6	6.3	12.9	500.0	515	3005	0.61	0.72	0.24	0.25	6.77	1
		735.6	6.3	12.9	500.0	515	3005	0.61	0.72	0.24	0.25	6.77	1
1-Aug		735.6	6.3	12.9	500.0	515	3005	0.61	0.72	0.24	0.25	6.77	1
		735.6	6.3	12.9	500.0	515	3005	0.61	0.72	0.24	0.25	6.77	1
2-Aug		1498.0	6.3	12.9	500.0	614.1	12620	0.64	1.07	0.18	0.88	7.26	1
		1498.0	6.3	12.9	500.0	614.1	12620	0.64	1.07	0.18	0.88	7.26	1
3-Aug		2.4	5.0	8.0	500.0	338.5	38720	0.18	0.6	0.22	0.1	6.99	1
		2.4	5.0	8.0	500.0	338.5	38720	0.18	0.6	0.22	0.1	6.99	1
4-Aug		1813.3	3.2	6.5	500.0	475.6	6715	0.01	0.38	0.22	4.22	7.12	1
		1813.3	3.2	6.5	500.0	475.6	6715	0.01	0.38	0.22	4.22	7.12	1
5-Aug		921.3	3.2	6.5	500.0	441.7	21315	0.26	0.62	0.25	0.16	6.95	1
		921.3	3.2	6.5	500.0	441.7	21315	0.26	0.62	0.25	0.16	6.95	1
29-Jul	5	1317.2	6.3	12.9	500.0	487.2	4087	0.5	0.71	0.23	0.45	4.71	1
		1317.2	6.3	12.9	500.0	487.2	4087	0.5	0.71	0.23	0.45	4.71	1
30-Jul		134.4	6.3	12.9	500.0	464.5	4496	0.17	0.66	0.24	0.82	4.71	1
		134.4	6.3	12.9	500.0	464.5	4496	0.17	0.66	0.24	0.82	4.71	1
31-Jul		134.4	6.3	12.9	500.0	464.5	4496	0.17	0.66	0.24	0.82	4.71	1
		134.4	6.3	12.9	500.0	464.5	4496	0.17	0.66	0.24	0.82	4.71	1
1-Aug		134.4	6.3	12.9	500.0	464.5	4496	0.17	0.66	0.24	0.82	4.71	1
		134.4	6.3	12.9	500.0	464.5	4496	0.17	0.66	0.24	0.82	4.71	1
2-Aug		2854.3	6.3	12.9	500.0	370.9	20700	0	1.58	0.14	0.31	7.53	1
		2854.3	6.3	12.9	500.0	370.9	20700	0	1.58	0.14	0.31	7.53	1
3-Aug		256.6	5.0	8.0	500.0	451.9	8716	0.04	0.36	0.22	0.55	7.65	1
		256.6	5.0	8.0	500.0	451.9	8716	0.04	0.36	0.22	0.55	7.65	1
4-Aug		984.8	3.2	6.5	500.0	343	15390	1.43	0.89	0.23	0.27	8.02	1
		984.8	3.2	6.5	500.0	343	15390	1.43	0.89	0.23	0.27	8.02	1
5-Aug		2756.6	3.2	6.5	500.0	508.5	68345	0.23	0.27	0.2	0.22	6.24	1
		2756.6	3.2	6.5	500.0	508.5	68345	0.23	0.27	0.2	0.22	6.24	1

Appendix 18 The boundary condition of ecosystem model for each compartments(Level=3)

	BD	P	SQN	SQP	Z	POC	DOC	PO4	NH4	NO2	NO3	DO	COD
		mgC/m³			mgC/m³	mgC/m³	mgC/m³	μM	μM	μM	μM	mg/L	
29-Jul	1	3812.3	6.3	12.9	500.0	484.3	5338	0.57	1.45	0.31	0.43	5.19	1
		3812.3	6.3	12.9	500.0	484.3	5338	0.57	1.45	0.31	0.43	5.19	1
30-Jul		6256.1	6.3	12.9	500.0	484.3	5338	0.57	1.45	0.31	0.43	5.19	1
		6256.1	6.3	12.9	500.0	484.3	5338	0.57	1.45	0.31	0.43	5.19	1
31-Jul		4799.6	6.3	12.9	500.0	521.7	4558	0.71	1.16	0.3	0.72	5.19	1
		4799.6	6.3	12.9	500.0	521.7	4558	0.71	1.16	0.3	0.72	5.19	1
1-Aug		2314.3	6.3	12.9	500.0	650	3588	0.528	1.05	0.21	0.68	7.68	1
		2314.3	6.3	12.9	500.0	650	3588	0.528	1.05	0.21	0.68	7.68	1
2-Aug		2314.3	6.3	12.9	500.0	650	3588	0.528	1.05	0.21	0.68	7.68	1
		2314.3	6.3	12.9	500.0	650	3588	0.528	1.05	0.21	0.68	7.68	1
3-Aug		1192.6	5.0	8.0	500.0	497.8	23570	0.93	0.39	0.26	0.39	7.5	1
		1192.6	5.0	8.0	500.0	497.8	23570	0.93	0.39	0.26	0.39	7.5	1
4-Aug		6141.2	3.2	6.5	500.0	477	28390	0.67	0.71	0.24	0.34	12.48	1
		6141.2	3.2	6.5	500.0	477	28390	0.67	0.71	0.24	0.34	12.48	1
5-Aug		3086.5	3.2	6.5	500.0	476.5	12680	0.17	0.83	0.23	0.35	6.73	1
		3086.5	3.2	6.5	500.0	476.5	12680	0.17	0.83	0.23	0.35	6.73	1
29-Jul	2	3812.3	6.3	12.9	500.0	484.3	5338	0.57	1.45	0.31	0.43	5.19	1
		3812.3	6.3	12.9	500.0	484.3	5338	0.57	1.45	0.31	0.43	5.19	1
30-Jul		6256.1	6.3	12.9	500.0	484.3	5338	0.57	1.45	0.31	0.43	5.19	1
		6256.1	6.3	12.9	500.0	484.3	5338	0.57	1.45	0.31	0.43	5.19	1
31-Jul		4799.6	6.3	12.9	500.0	521.7	4558	0.71	1.16	0.3	0.72	5.19	1
		4799.6	6.3	12.9	500.0	521.7	4558	0.71	1.16	0.3	0.72	5.19	1
1-Aug		2314.3	6.3	12.9	500.0	650	3588	0.528	1.05	0.21	0.68	7.68	1
		2314.3	6.3	12.9	500.0	650	3588	0.528	1.05	0.21	0.68	7.68	1
2-Aug		2314.3	6.3	12.9	500.0	650	3588	0.528	1.05	0.21	0.68	7.68	1
		2314.3	6.3	12.9	500.0	650	3588	0.528	1.05	0.21	0.68	7.68	1
3-Aug		1192.6	5.0	8.0	500.0	497.8	23570	0.93	0.39	0.26	0.39	7.5	1
		1192.6	5.0	8.0	500.0	497.8	23570	0.93	0.39	0.26	0.39	7.5	1
4-Aug		6141.2	3.2	6.5	500.0	477	28390	0.67	0.71	0.24	0.34	12.48	1
		6141.2	3.2	6.5	500.0	477	28390	0.67	0.71	0.24	0.34	12.48	1
5-Aug		3086.5	3.2	6.5	500.0	476.5	12680	0.17	0.83	0.23	0.35	6.73	1
		3086.5	3.2	6.5	500.0	476.5	12680	0.17	0.83	0.23	0.35	6.73	1
29-Jul	3	2463.3	6.3	12.9	500.0	419.9	2762	0.67	1.89	0.24	0.8	6.37	1
		2463.3	6.3	12.9	500.0	419.9	2762	0.67	1.89	0.24	0.8	6.37	1
30-Jul		1757.1	6.3	12.9	500.0	374.9	3377	0.33	1.03	0.25	0.39	6.37	1
		1757.1	6.3	12.9	500.0	374.9	3377	0.33	1.03	0.25	0.39	6.37	1
31-Jul		1757.1	6.3	12.9	500.0	374.9	3377	0.33	1.03	0.25	0.39	6.37	1
		1757.1	6.3	12.9	500.0	374.9	3377	0.33	1.03	0.25	0.39	6.37	1
1-Aug		1757.1	6.3	12.9	500.0	374.9	3377	0.33	1.03	0.25	0.39	6.37	1
		1757.1	6.3	12.9	500.0	374.9	3377	0.33	1.03	0.25	0.39	6.37	1
2-Aug		461.9	6.3	12.9	500.0	556.9	3949	0.107	1.09	0.22	0.38	8.61	1
		461.9	6.3	12.9	500.0	556.9	3949	0.107	1.09	0.22	0.38	8.61	1
3-Aug		1151.0	5.0	8.0	500.0	368.1	17670	0.8	0.81	0.21	5.82	5.41	1
		1151.0	5.0	8.0	500.0	368.1	17670	0.8	0.81	0.21	5.82	5.41	1
4-Aug		356.8	3.2	6.5	500.0	326.1	15895	0.12	0.45	0.27	0.28	5.87	1
		356.8	3.2	6.5	500.0	326.1	15895	0.12	0.45	0.27	0.28	5.87	1
5-Aug		5325.0	3.2	6.5	500.0	602.2	46940	1.38	1.95	0.24	0.2	4.52	1
		5325.0	3.2	6.5	500.0	602.2	46940	1.38	1.95	0.24	0.2	4.52	1

Appendix 18 The boundary condition of ecosystem model for each compartments(Level=3 continued)

	BD	P	SQN	SQP	Z	POC	DOC	PO4	NH4	NO2	NO3	DO	COD
		mgC/㎥			mgC/㎥	mgC/㎥	mgC/㎥	μM	μM	μM	μM	mg/L	
29-Jul	4	3394.4	6.3	12.9	500.0	356.4	3252	0.26	0.83	0.23	0.36	6.32	1
		3394.4	6.3	12.9	500.0	356.4	3252	0.26	0.83	0.23	0.36	6.32	1
30-Jul		1153.5	6.3	12.9	500.0	554.6	23990	0.29	1.82	0.24	0.38	6.32	1
		1153.5	6.3	12.9	500.0	554.6	23990	0.29	1.82	0.24	0.38	6.32	1
31-Jul		1153.5	6.3	12.9	500.0	554.6	23990	0.29	1.82	0.24	0.38	6.32	1
		1153.5	6.3	12.9	500.0	554.6	23990	0.29	1.82	0.24	0.38	6.32	1
1-Aug		1153.5	6.3	12.9	500.0	554.6	23990	0.29	1.82	0.24	0.38	6.32	1
		1153.5	6.3	12.9	500.0	554.6	23990	0.29	1.82	0.24	0.38	6.32	1
2-Aug		3531.3	6.3	12.9	500.0	580.6	19050	0.39	0.83	0.18	0.57	7.52	1
		3531.3	6.3	12.9	500.0	580.6	19050	0.39	0.83	0.18	0.57	7.52	1
3-Aug		2.4	5.0	8.0	500.0	339.2	9004	2.5	0.22	0.21	0.15	7.44	1
		2.4	5.0	8.0	500.0	339.2	9004	2.5	0.22	0.21	0.15	7.44	1
4-Aug		620.7	3.2	6.5	500.0	548.1	5587	0.1	0.66	0.22	2.65	5.94	1
		620.7	3.2	6.5	500.0	548.1	5587	0.1	0.66	0.22	2.65	5.94	1
5-Aug		2226.3	3.2	6.5	500.0	298.3	8672.5	0.12	2	0.21	0.3	5.62	1
		2226.3	3.2	6.5	500.0	298.3	8672.5	0.12	2	0.21	0.3	5.62	1
29-Jul	5	2341.1	6.3	12.9	500.0	458.1	7276	0.39	0.97	0.22	0.35	4.1	1
		2341.1	6.3	12.9	500.0	458.1	7276	0.39	0.97	0.22	0.35	4.1	1
30-Jul		1732.6	6.3	12.9	500.0	453.7	3781	0.21	1.1	0.34	0.23	4.1	1
		1732.6	6.3	12.9	500.0	453.7	3781	0.21	1.1	0.34	0.23	4.1	1
31-Jul		1732.6	6.3	12.9	500.0	453.7	3781	0.21	1.1	0.34	0.23	4.1	1
		1732.6	6.3	12.9	500.0	453.7	3781	0.21	1.1	0.34	0.23	4.1	1
1-Aug		1732.6	6.3	12.9	500.0	453.7	3781	0.21	1.1	0.34	0.23	4.1	1
		1732.6	6.3	12.9	500.0	453.7	3781	0.21	1.1	0.34	0.23	4.1	1
2-Aug		3296.7	6.3	12.9	500.0	407.1	7870	0.469	1.59	0.21	0.48	6.3	1
		3296.7	6.3	12.9	500.0	407.1	7870	0.469	1.59	0.21	0.48	6.3	1
3-Aug		1981.9	5.0	8.0	500.0	501.4	54330	0.79	1.4	0.21	0.33	6.83	1
		1981.9	5.0	8.0	500.0	501.4	54330	0.79	1.4	0.21	0.33	6.83	1
4-Aug		1502.9	3.2	6.5	500.0	350.4	3989	0.46	0.45	0.23	0.35	10.01	1
		1502.9	3.2	6.5	500.0	350.4	3989	0.46	0.45	0.23	0.35	10.01	1
5-Aug		948.2	3.2	6.5	500.0	384.5	68565	0.59	0.82	0.23	0.98	5.72	1
		948.2	3.2	6.5	500.0	384.5	68565	0.59	0.82	0.23	0.98	5.72	1

Appendix 19 Relationship among the Chl.a, Carbon and Cell density of *Cochlodinium polykrikoides*

Cell/mL	Carbon(mgC/㎥)	Cell/mL	Chl.a(μg/L)
190	1854.0	1000	0.8
880	2390.0	2050	5.4
1760	2916.0	3000	7.1
3300	4605.0	5000	7.3
3380	5180.0	5400	8.4
3400	5520.0	6150	8.9
2890	5121.0	8010	9.1
* By Kang, 2003		*By Shim, 1998	

감사의 글

나는 박이문(朴異汶) 선생님의 글을 좋아합니다.

"만일, 내 자신을 위한 지적, 정신적 추구(追求)의 결과가 혹시 남의 사고에 다소나마 자극(刺戟)이 되고 사회에 티끌만큼이라도 공헌(貢獻)이 될 수 있다면, 그것은 기막히게 기적적인 요행(僥倖)으로, 나에게는 한없는 기쁨이 될 것이다('나의 걸어온 길과 걸어갈 삶의 길')."

지금 햇수로 14년을 앉아있게 되는 학교실험실의 시약냄새가 배인 책상 위에서 다시 이 글을 읽으며, 지난 시간, 학위 논문을 준비하면서 보냈던 조사, 실험, 심사과정들을 다시 떠올려 봅니다. 지난 몇 년간은 여러 선배님들이 먼저 지나갔던 길을 겨우 맛만 본 중에서도, 연구를 위해서 온갖 잡된 세속적 욕망에 구애(拘礙)받지 않기까지 인간적으로 얼마나 치열한 결단을 요구하는가를 알 수 있는 호된 경험이었습니다.

아버지의 정으로 이끌어 주신 지도교수님 박청길 선생님의 의도가 나 개인적인 학문적인 성취에 있는 것이 아니라 '남의 사고에 다소나마 자극이 될 수 있는' 작은 역할이나마 끊임없이 요구하신 것임을 새삼 마음에 새기며, 심사과정에서 세심한 배려와 조언을 아끼지 않으셨던 여석준 교수님과, 심사위원석에서 오히려 defence를 해주시던, 이석모 교수님, 강임석 교수님과 연구의 시작을 열어주셨던 최우정 박사님께 감사의 마음을 전합니다.

언제, 어디서고 격려를 아끼지 않으셨던 여러 선배박사님들, 최영찬 교수님, 김광수 교수님, 박종수 박사님, 최희구 박사님, 유선재 교수님, 조현서 교수님, 송교욱 박사님, 신성교 박사님, 김경태 박사님, 김태윤 박사님, 김도희 교수님, 조은일 교수님께도 감사의 뜻을 전합니다.

연구수행과정에서 낮이나 밤늦은 시간에도 귀찮아하지 않고 지도와 조언을 해주신 정연철 교수님과 멀리서도 실질적인 도움을 주신 김동명 박사님, 자신의 일처럼 도와주신 이대인 박사님과, 박해식 박사님, 김형철 연구사님, 박성은 박사님께도 감사드립니다.

바쁜 와중에도 자신의 일처럼 시료분석을 해주신 이원찬 박사님, 구준호님과, 함께 했던 조사분석과 대화와 토론으로 큰 도움을 주셨던 손재경 박사님, 강양순 박사님께 진심으로 감사를 드립니다.

3년 동안 곁에서 자극과 격려를 아끼지 않으셨던, NFRDI 통영 Lab.의 손상규 소장님, 박정흠 실장님, 손팔원 소장님과 문태석 연구관님, 정창수 연구관님, 정승희 박사님, 김성태 박사님, 변순규 박사님과 자식처럼 아껴주시던 탐구10호의 윤형열 선장님, 옥수권 국장님, 박삼수 기관장님, 서일규 갑판장님, 설정안님과, 우미경님, 고향과도 같은 통영을 지켜주실 유현덕 연구사님과 궂은 일일 마다 않고 도와준 양수경님, 윤정일님, 서정화님, 박성미님, 이민경님, 김동권님, 조동호님께 특별한 감사의 마음을 전합니다. 귀찮아하지 않고 글자 하나 하나를 읽으며 거듭거듭 교정을 해준 이성호 선배님과 항상 자신을 돌아보도록 충고를 아끼지 않았던 Meitec Eng.의 최석원 부장님께 감사의 마음을 전합니다. 언제나 마음의 고향인 실험실을 어려운 중에서도 밝은 얼굴로 지켜준 장주형 후배님을 비롯한 수질연구실의 여러 선후배님 들께도 감사드립니다.

생면부지의 타인에게 자료를 개방해준 Fumio Horiguchi님, Jouji Yamamoto님, Yasuo Nakamura님과 틀린 실험에도 깨알같이 코멘트를 달아준 Mineo Yamaguchi님께도 감사드립니다.

염려와 걱정과 눈물로 지켜보아 주신 부모님 형제들과 누구보다 기뻐 해주실 할아버지, 할머니께도 감사드립니다. 또한, 항상 곁에 있는 듯 안타까움과 관심으로 힘을 돋아 주신 김종구 교수님과 형제에게 줄 수 있는 이상의 정으로 연구의 전 과정을 변함없는 믿음으로 도와 주셨던 권정노 박사님께 특별히 감사드립니다.

돌이켜 보면 너무나도 많은 분들에게 말로는 다할 수 없는 감사를 표현해야 하며, 이분들로부터 내가 누릴 수 있었던 은혜와 기회가 의미 없는 것이 되지 않도록 이제부터라도 더 철저하고 치열하게 살아야 하겠다는 각오를 해봅니다.