

물질순환모델을 이용한 제주항의 수질관리(II) - 제주항의 수질 특성과 오염부하량 산정 -

조은일·강기봉
제주대학교 환경공학과
(2003년 2월 14일 접수; 2003년 3월 22일 채택)

Water quality management of Jeju Harbor using material cycle model(II)

- Characteristics of water quality in Jeju harbor and the estimation of pollutant loadings -

Eun-Il Cho and Ki-Bong Kang

Dept. of Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea
(Manuscript received 14 February, 2003; accepted 22 March, 2003)

The purpose of this study is to investigate the characteristics of water quality in Jeju harbor and to estimate pollutant loadings discharged into Jeju Harbor. To know characteristics of water quality in Jeju harbor and pollutant loadings of Sanzi river, we have investigated from August, 2000 to May, 2001.

The results showed that the concentrations of COD, DIN and DIP were in the range of 1.00~4.85 mg/L (mean 2.15 mg/L), 2.14~74.0 $\mu\text{g-at/L}$ (mean 12.20 $\mu\text{g-at/L}$) and 0.52~4.00 $\mu\text{g-at/L}$ (mean 1.18 $\mu\text{g-at/L}$), respectively. These values were under III class of seawater quality criteria. The ratio of nitrogen to phosphorus was lower than 16 except for Station 1 in Jeju harbor. Therefore, nitrogen was playing an important role in phytoplankton growth as limiting factor in Jeju harbor. The mean values of eutrophication index were exceeding 1, which was the eutrophication criteria.

The results of estimating pollutant loadings at Sanzi river are 0.30 ton/day for COD, 300 kg/day for DIN and 18.0 kg/day for DIP, respectively.

Key words : Water quality, Pollutant loadings, Eutrophication index, Seawater quality criteria

1. 서론

제주 연안에는 총 7개의 항만이 있으며 2개의 무역항과 5개의 연안항으로 구성되어 있다. 그 중에 제주항은 무역항으로 제주도의 북부 중앙에 위치하고 있고 항내 수면적이 7.904 km²인 항만법상 1종 항으로 제주로 유입되는 총 화물의 64%를 담당하고 있다. 제주항의 구조적 특성을 보면 항구 외부는 방파제와 같은 구조물로 구성되어 있으며 항내는 물 흐름이 원활하지 못하기 때문에 오염된 해수의

정체와 각종 어업성 폐기물의 침전 그리고 주변지역에서 발생되는 미처리된 생활오수 등으로 인해 항내 수질이 악화되고 있는 실정이며, 우리나라 환경부에서도 이들 해역 수질 등급을 III등급으로 정해놓고 있다.^{1,2)} 제주항을 오염시키는 주된 육상 오염원은 산지천이며 한라산 중턱에서 시작하여 산천단과 아라동을 거쳐 제주항 인근해안으로 흘러드는 하천으로 미처리된 하수가 유입되어 고이거나 땅속으로 스며들기도 하고 해역으로 유출되고 있어 지하수와 제주항의 수질오염을 일으키는 하천이다.^{3,4)}

항만이나 연안해역에 대한 오염원은 여러 가지가 있으나, 제주항의 경우는 산지천과 같이 육상으로부터 유입되는 하천오염부하가 해양환경에 미치는

Corresponding Author : Eun-Il Cho, Dept. of Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea
Phone : +82-064-754-3447
E-mail : eunilcho@cheju.ac.kr

영향이 크다고 할 수 있다.⁵⁾ 전보에서 조사된 결과를 보면, 제주항의 물리해양환경의 변화에 크게 영향을 미치는 것은 담수 유입인 산지천이며 산지천에 많은 오염물질이 함유되어 있을 경우, 하계에는 항만전체의 전 표층에 밀도류의 영향으로 인하여 오염물질의 영향이 크게 미칠 것으로 예상되었다.⁶⁾ 그러므로 제주항의 수질관리를 위해서는 산지천 오염부하의 영향에 대한 정량적인 평가와 하천의 영향을 받는 해역의 수질오염조사가 병행되어 이루어져야 한다. 이러한 평가가 이루어진 후에 해역으로 유입된 오염물질의 분포특성을 파악할 수 있으며 또한 오염부하 저감에 대한 정량적인 수질관리 방안을 제시하기 위해서 물질순환모델과 같은 수치모델을 이용하여 시뮬레이션을 실시할 수 있다.⁷⁾

따라서 본 연구는 물질순환모델을 이용하여 제주항의 수질관리 방안을 도출하기 위한 기초 조사 연구로 제주항의 수질을 예측하고 평가하기 위한 수질특성과 육상오염부하량에 대한 기초적인 자료를 제공하는 것이 목적이다. 그래서 본 연구에서는 육상으로부터 유입되는 산지천의 수질특성과 오염부하량 그리고 그로 인해 변화되는 제주항의 해역 수질특성을 각 계절별로 조사하여 오염부하의 정량적 관리를 위한 물질순환모델의 기초입력자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상 지역

제주항의 수질특성을 파악하고 하천 오염부하량을 산정하기 위한 대상지역은 전보와 같다.⁶⁾

제주항의 경우 산지천을 기점으로 항만 입구부까지 총 5개 지점을 선정하여 각 층별로 수질조사를 행하였고, 육상오염부하 조사지점은 산지천의 하류부분인 용진교 앞 지점에서 조사를 하였으며 오염부하량은 조사된 산지천 유량과 각 수질항목별 농도를 이용하여 산정하였다.

본 연구에 적용한 산지천은 준용하천으로 제주시 관내에 위치하고 있고 동측 및 서측으로는 준용하천인 화북천 유역과 독사천 유역이 접하고 있으며 남측으로는 한라산과 접하여 있고 북측으로는 바다와 접하고 있다. 산지천의 수원은 한라산의 중산간에서 발원하여 지하로 침투하며 하천에는 유수가 있는 것이 아니고 바다와 인접한 하류에만 용천수로 인한 유수가 있으며 주변지역에서 처리되지 않은 하수가 유입되고 있다.⁴⁾

2.2. 연구 방법

물질순환모델을 이용한 제주항의 수질관리를 위한 연구 방법은 Fig. 1에 나타내었다.

어떤 해역의 수질관리를 행하기 위해서는 해역으로 유입되는 오염부하에 대한 조사가 선행되어야 하고 그 오염물질에 대한 해역 내의 물질거동과 수질정도를 파악하여야 하며 마지막으로 해역의 수질정화를 위한 오염부하의 저감방안에 대하여 연구가 이루어져야 한다. 따라서 제주항의 수질관리를 위한 연구에서는 단계를 크게 세 가지로 나누었다. 첫 단계는 전보⁶⁾에 발표된 물질순환모델 중 해수유동모델(Hydrodynamic model)을 이용하여 제주항의 오염물질의 거동을 파악할 수 있는 물리해양환경의 변화에 대하여 조사한 것이고, 두 번째 단계는 본 연구에서 수행한 제주항의 수질을 예측하고 평가하기 위하여 육상으로부터 유입되는 오염부하와 그로 인한 제주항의 수질 특성에 대하여 조사한 것이다. 그리고 마지막 단계는 생태계 모델을 이용하여 오염부하의 정량적인 관리방안을 제시할 예정이다.

2.3. 수질 조사 및 분석 방법

현황조사는 육상 부하량 조사와 해역수질조사로 나눌 수 있으며 조사지점은 Fig. 2에 나타내었다.

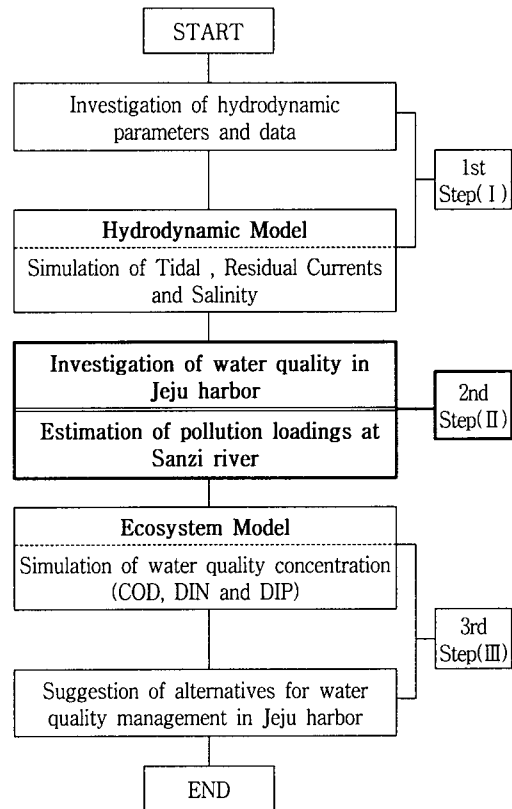


Fig. 1. Flow diagram of material cycle model for water quality management in Jeju harbor.

우선 하천 오염부하량을 측정하기 위해 제주항으로 유입되는 산지천에 대하여 2000년 8월, 11월, 2001년 2월 그리고 5월에 총 4회에 걸쳐 채수하여 분석하였다.

제주항의 수질특성을 조사하기 위하여 육상오염 부하의 영향을 가장 많이 받는 낙조시를 중심으로 2000년 8월, 11월, 2001년 2월 그리고 5월에 총 4회에 걸쳐 총 5개의 정점에서 반돈채수기를 이용하여 층별(표층(0m), 중층(5m) 그리고 저층(bottom))로 시료를 채수하여 수질조사를 행하였다.

수질조사항목과 분석법은 수질오염공정시험법(2001) 및 해양환경공정시험법(1998)에 준하는 시험법으로 행하였다.⁸⁾

수온은 봉상온도계로 현장에서 측정하였고, 염분은 Salinometer(YSI 30)를 이용하였으며, 수소이온 농도(pH)는 pH meter(Orion 290 A)를 사용하여 측정하였다. 용존산소(dissolved oxygen)는 윙클러-아지드화나트륨(winkler-azide natrium)변법으로 측정하였고, 부유물질(suspended solid)은 유리섬유여지(GF/C)를 이용하여 시료 일정량을 여과, 건조 후 무게 차로 측정하였으며, 화학적산소요구량 (Chemical Oxygen Demand)은 하천수의 경우, 산성과 망간간 칼륨법과 해수의 경우, 알카리성 과망간산 칼륨법으로 측정하였다. 영양염류로서 암모니아질소(NH₄⁺-N)는 Indophenol법으로, 아질산질소(NO₂⁻-

N)는 NED법으로, 질산질소(NO₃⁻-N)는 하천수의 경우, 부루신법과 해수의 경우, Cd-Cu 환원법으로 측정하였다. 인산인(PO₄³⁻-P)은 아스코르브산법으로, 클로로필 a(Chlorophyll a) 농도는 Strickland & Parson법으로 비색, 정량하였다.⁹⁾ 그리고 입자성 유기탄소(POC)는 GF/F filter로 시수 일정량을 여과하여 걸러진 filter를 CHN분석기(MT-2형)를 이용하여 정량하였고 용존성 유기탄소(DOC)는 GF/F filter로 여과된 시수 여액을 TOC analyzer (TOC-5000A)를 이용하여 정량하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 제주항의 해역 수질 현황

제주항의 수질특성을 조사하기 위하여 계절별로 총 4회에 걸쳐 5개의 지점에서 표층수, 중층수 그리고 저층수를 채수하여 분석한 조사지점별 범위 및 평균값을 Table 1에 나타내었다. COD, DIN 그리고 DIP 항목에 대하여 해역의 하천유입부에서 외해역으로 이어지는 정점 St 1, 2, 3, 4 그리고 5를 연결한 선의 수평분포를 Fig. 3, 4 그리고 Fig. 5에 나타내었다.

3.1.1. 일반 항목의 수질 변동 특성

밀도류의 영향을 알 수 있는 염분은 표층에서 21.1~33.9‰, 중층에서 28.6~33.9‰ 그리고 저층에서 28.8~33.9‰의 범위를 나타내었으며, 월별로는 유입수량이 많은 8월이 상대적으로 낮은 값을 보였고, 일사량과 일조시간의 영향을 받는 수온분포를 보면, 표층에서 12.9~28.2℃, 중층에서 13.3~26.6℃ 그리고 저층에서 13.6~25.5℃의 범위를 나타내었으며, 연교차는 약 14℃였다. 월별로는 2월이 가장 낮은 분포를 보였고 8월이 가장 높은 수온분포를 보였다.

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

해수 중 현탁입자의 농도를 나타내는 총부유물질(TSS)의 분포를 보면, 전 조사기간에 걸쳐, 표층에서 2.2~9.4 mg/L(평균 4.8 mg/L), 중층에서 2.0~6.8 mg/L(평균 3.9 mg/L) 그리고 저층에서 1.40~5.5 mg/L(평균 3.5 mg/L)의 범위를 나타내었고, 만내 전체 평균값은 4.3 mg/L을 나타내었다.

3.1.2. 화학적 산소요구량 (COD)

해역에서 유기오염의 일반 지표인 COD의 지점별 농도 분포는 Fig. 3에 나타내었다. COD의 농도

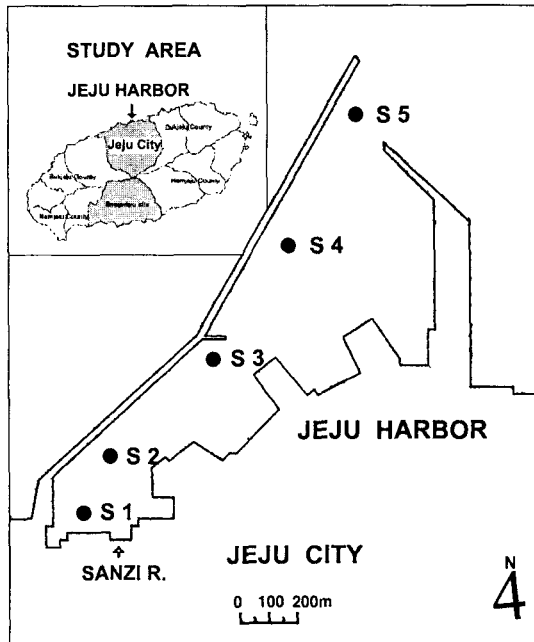


Fig. 2. Location of stations for sampling in the Jeju Harbor.

조은일·강기봉

Table 1. Range and mean values of water quality in Jeju harbor

| St. No. | Temp. | Sal. | COD | DO | SS | DIP | DIN | POC | DOC | Chl.a |
|---------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| level | (°C) | (‰) | (mg/L) | (mg/L) | (mg/L) | ($\mu\text{g-at/L}$) | ($\mu\text{g-at/L}$) | (mg/L) | (mg/L) | $\mu\text{g/L}$ |
| S1 | 12.9~27.4 19.3 | 21.0~32.0 25.3 | 3.2~4.9 3.9 | 5.5~8.1 6.9 | 4.9~9.4 7.4 | 2.30~4.00 2.95 | 54.00~74.00 65.50 | 0.60~1.43 0.97 | 2.26~3.87 2.67 | 0.126~6.410 3.138 |
| | 12.9~28.2 19.6 | 26.9~32.4 29.8 | 2.5~3.4 2.9 | 5.1~8.2 6.0 | 2.6~8.4 5.0 | 1.13~1.36 1.24 | 7.20~21.43 14.84 | 0.42~0.85 0.61 | 2.13~3.90 2.79 | 0.145~5.550 3.059 |
| S2 | 13.3~26.0 19.2 | 28.6~33.4 31.9 | 1.6~3.1 2.3 | 5.5~8.0 6.4 | 3.5~6.2 4.5 | 0.74~1.39 1.26 | 5.71~18.47 12.71 | 0.23~0.60 0.45 | 1.43~3.60 2.22 | 0.048~3.398 1.425 |
| | 13.3~27.7 19.6 | 27.8~33.2 31.7 | 2.1~3.8 2.7 | 5.9~8.0 6.9 | 2.5~5.6 4.1 | 0.87~1.36 1.07 | 4.05~15.14 11.67 | 0.23~0.76 0.45 | 1.74~3.13 2.47 | 0.046~5.443 2.900 |
| S3 | 13.5~25.8 19.2 | 28.8~33.8 32.1 | 1.4~3.4 2.1 | 6.7~8.2 7.3 | 3.1~6.8 4.7 | 0.75~1.42 1.01 | 2.86~12.62 9.58 | 0.05~0.73 0.40 | 1.27~2.13 1.62 | 0.133~1.749 0.683 |
| | 13.4~27.7 19.6 | 27.8~33.7 31.9 | 1.7~2.5 2.2 | 5.6~8.2 7.2 | 3.0~5.0 4.0 | 0.57~1.36 1.03 | 3.88~13.74 8.80 | 0.36~0.78 0.49 | 1.60~2.27 1.89 | 0.060~4.412 1.928 |
| S4 | 13.6~25.7 19.2 | 28.8~33.8 32.1 | 1.2~2.4 1.9 | 6.4~8.3 7.5 | 2.1~4.7 3.4 | 0.58~1.42 1.03 | 2.86~12.18 6.90 | 0.14~0.43 0.31 | 1.61~2.06 1.80 | 0.063~1.233 0.463 |
| | 13.6~23.8 18.8 | 28.8~33.9 32.2 | 1.0~2.1 1.8 | 6.0~8.3 7.4 | 3.9~5.5 4.5 | 0.79~1.48 1.15 | 3.42~12.27 6.83 | 0.11~0.65 0.39 | 1.05~2.14 1.49 | 0.010~0.831 0.250 |
| | 13.7~27.3 19.8 | 28.0~33.9 32.0 | 1.2~2.5 2.0 | 5.9~8.4 7.6 | 2.2~5.0 3.7 | 0.62~1.16 0.87 | 3.84~10.85 7.68 | 0.29~0.72 0.52 | 1.43~2.31 1.75 | 0.020~1.474 0.541 |
| S5 | 13.5~25.6 19.2 | 28.9~33.9 32.2 | 1.2~2.1 1.8 | 6.2~9.1 7.9 | 2.0~3.8 3.0 | 0.79~1.19 0.99 | 2.14~8.75 5.72 | 0.11~0.50 0.35 | 1.30~2.29 1.74 | 0.010~1.252 0.343 |
| | 13.6~25.5 19.2 | 28.9~33.9 32.3 | 1.2~2.1 1.6 | 6.0~9.0 7.8 | 1.4~4.6 2.6 | 0.90~1.16 1.05 | 3.37~6.95 5.50 | 0.05~0.57 0.35 | 1.15~2.21 1.61 | 0.010~0.650 0.160 |

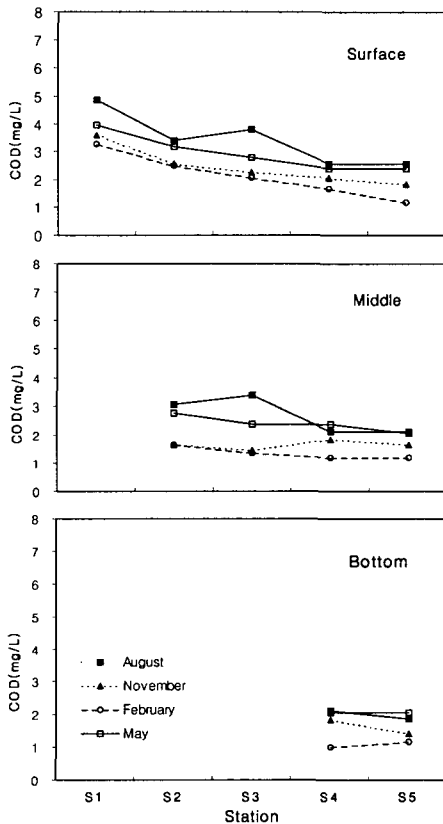


Fig. 3. Variations of COD(mg/L) at each stations.

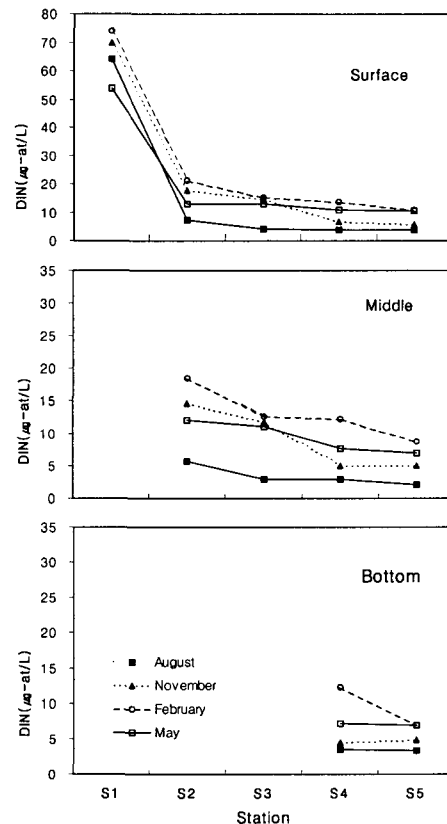


Fig. 4. Variations of DIN($\mu\text{g-at/L}$) at each stations.

분포를 보면, 전 조사기간에 걸쳐, 표층에서 1.2~4.9 mg/L(평균 2.7 mg/L), 중층에서 1.2~3.4 mg/L(평균 2.0 mg/L) 그리고 저층에서 1.0~2.1 mg/L(평균 1.7 mg/L)의 범위를 나타내었고 만내 전체 평균값은 2.2 mg/L을 나타내었으며, 대상해역의 대부분이 III 등급 해역에 속하였다. 월별로는 8월과 5월이 각각 2.7 mg/L과 2.5 mg/L로 높았고 2월이 1.5 mg/L로 가장 낮은 값을 보였다. 지점별로 보면 하천수가 많이 유입되는 만 안쪽 지점인 St. 1이 조사기간 동안에 높은 값을 보이는 것을 알 수 있으며, St. 5 까지 외해로 갈수록 표층에서 2.0~3.9 mg/L로 낮아졌고, 특히 만폭이 좁고 유속이 큰 St. 3에서 월변화량이 가장 크게 나타났다.

3.1.3. 클로로필 a (Chlorophyll a)

해역에서 자생유기물질의 하나인 식물성플랑크톤은 대체적으로 부영양화된 해역에서 환경조건이 적합할 때 대량으로 번식하는데 그 양은 엽록소(Chl. a)의 양으로 나타낸다.

해수 중에서 식물성플랑크톤의 양을 나타내는 Chl. a의 분포를 보면, 전 조사기간에 걸쳐, 표층에서

0.020~6.410 $\mu\text{g/L}$, 중층에서 0.010~3.398 $\mu\text{g/L}$ 그리고 저층에서 0.010~0.831 $\mu\text{g/L}$ 의 범위를 나타내었다. 월별 농도변화는 8월이 각 층별 4.395 $\mu\text{g/L}$, 1.908 $\mu\text{g/L}$ 그리고 0.721 $\mu\text{g/L}$ 로 상대적으로 높은 값을 보여 하계에 식물성플랑크톤의 농도가 가장 크게 나타났고, 2월에 낮은 값을 나타내었다. 지점별로는 하천부하량이 유입하는 St. 1이 조사 기간동안에 높은 값을 보이는 것을 알 수 있으며 St. 5 까지 외해로 갈수록 값이 대체적으로 낮은 값을 보이는 것을 알 수 있다.

3.1.4. DIN

해역의 부영양화에 관계되며 영양염 중 암모니아 질소, 아질산질소 그리고 질산질소의 합계량으로 나타내는 용존무기질소 분포는 Fig. 4에 나타내었으며, 조사 기간 중 DIN의 농도는 표층에서 3.84~74.00 $\mu\text{g-at/L}$, 중층에서 2.14~18.47 $\mu\text{g-at/L}$ 그리고 저층에서 3.37~12.27 $\mu\text{g-at/L}$ 의 범위를 나타내며 평균농도는 각각 21.69 $\mu\text{g-at/L}$, 8.73 $\mu\text{g-at/L}$ 그리고 6.16 $\mu\text{g-at/L}$ 였다.

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

본 해역에서 측정된 표층의 용존무기질소 농도를 2001년 개정 전 해역수질환경기준인 농도와 비교해보면, 평균농도에서 III등급수인 14.2 $\mu\text{g-at/L}$ 를 초과하는 것으로 조사되었다.

3.1.5. DIP

용존무기인(DIP)은 DIN과 함께 해양생물의 제한인자로 작용하는 중요한 영양염의 하나로 도시하수에 포함되어 있는 합성세제와 저층 퇴적물의 용출이 주부하원이며 Fig. 5에 나타내었다.

인산 염의 농도분포를 보면, 전 조사기간에 걸쳐, 표층에서 0.57~4.00 $\mu\text{g-at/L}$, 중층에서 0.58~1.42 $\mu\text{g-at/L}$ 그리고 저층에서 0.79~1.47 $\mu\text{g-at/L}$ 의 범위를 나타내며 평균농도는 각각 1.43 $\mu\text{g-at/L}$, 1.01 $\mu\text{g-at/L}$ 그리고 1.09 $\mu\text{g-at/L}$ 을 나타내었다.

지점별로는 하천수가 유입하는 만 안쪽이 높고 외해로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었으나 5월과 8월에 만 중앙부에서 상승하는 경향을 보여 영양염 용출의 영향을 보인다. 표층에서 하천유입부인 St. 1지점과 St. 2지점의 수평분포는 2.95~1.24 $\mu\text{g-at/L}$ 로 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. St. 1지점 표층에서 DIP의 월별 농도변화가 2.30~4.00

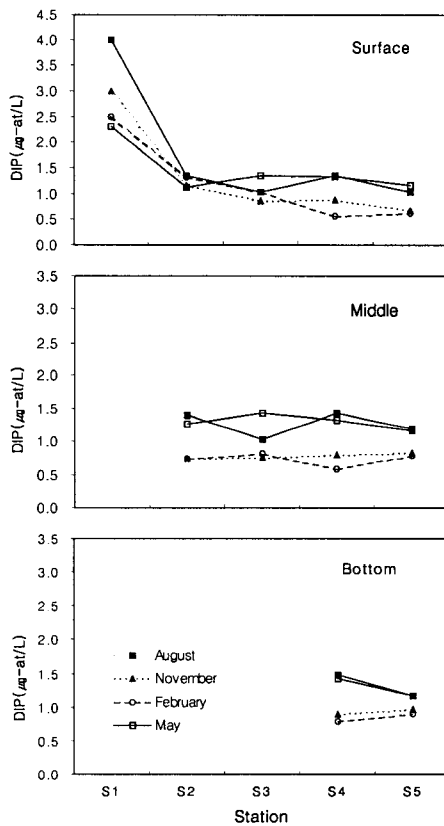


Fig. 5. Variations of DIP($\mu\text{g-at/L}$) at each stations.

$\mu\text{g-at/L}$ 가 가장 높게 나타났으며, 월별농도변화를 보면 용존무기질소와는 반대의 경향을 보이는 것을 알 수 있으며 2월에 최소값을 보이고 8월에 최대값을 보였다. 이 결과는 2001년 개정되기 전 해역수질환경기준인 농도와 비교하면 평균농도로 III등급수($0.97 \mu\text{g-at/L}$)의 높은 수질을 나타내었다.

3.2. 부영양도 평가 및 N/P 비

질소나 인과 같은 식물영양염류가 해역의 수중에 적당히 들어 있으면 영양염류를 섭취하는 식물플랑크톤이 알맞게 번식하여 해역의 기초생산력이 높아 지지만, 육상으로부터 생활하수나 산업폐수가 대량으로 유입하여 해역의 영양염류 농도가 너무 높아지면 해역은 부영양화되고 해역의 부영양화는 식물플랑크톤이 일시에 대량 번식하는 원인이 되어 적조현상을 일으킬 수 있다.¹⁰⁾

제주항의 수질분석결과를 보면 항내의 대부분 정점에서 COD, N, P의 농도분포가 해역수질등급 III 등급으로 조사되었다. 이러한 COD, N, P의 수질현황과 관련하여 대상해역에서의 부영양도 정도와 조류성장에 필요한 영양염에 대한 제한인자를 평가하기 위하여 해역의 부영양도와 N/P ratio를 Table 2에 나타내었다.

용존무기질소(DIN)와 용존무기인(DIP)의 비율인 N/P비는 식물플랑크톤의 원소비가 N : P가 16 : 1이므로 N/P비가 16보다 크면 질소계 무기영양염류가 인산염보다 풍부하므로 인이 식물플랑크톤의 제어인자가 되며 반대로 16보다 적으면 질소가 제어인자가 되는 것으로 일반화시킬 수 있다. 산지천 유입수의 영향을 받는 정점 St. 1은 N/P비가 16이

상으로 인이 제한 인자이지만, 그 외의 대부분의 정점에서는 16이하를 나타내어 제주항 내에서 식물플랑크톤 성장의 제한 인자는 질소인 것으로 나타났다.

해역에서 적조를 유발하는 영양염 농도를 이용하여 부영양화 지수(Eutrophication Index)를 산정하고 이 부영양화 지수를 기준으로 해역의 부영양도를 평가하는 방법이 있으며, 이는 부영양화로 인하여 적조가 발생할 때, 그 초기에 나타나는 규조류의 세포수 10^3 개체수/ml에 포함된 0.83 mgC/L (=COD 1 mg/L)의 탄소량을 기준으로 하고 N, P에 대해서는 각각 $7.14 \mu\text{g-at/L}$ 및 $0.48 \mu\text{g-at/L}$ 을 적조 발생 가능 농도로 보고 계산한 값을 부영양도 1로서 평가하는 방법이다.¹¹⁾

Eutrophication Index(EI)=

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

부영양도 지수를 보면, 제주항만 내에서는 계절에 상관없이 기준치인 1을 훨씬 초과하는 것으로 나타났으며, 특히 지점별로는 산지천이 유입되는 St. 1에서는 매우 높은 값을 보이고 있었다. 그 외 지점의 값을 보면 산지천 유입수의 영향이 적어질수록 부영양도 지수가 점차 낮아지는 것을 알 수 있었다.

3.3. 산지천의 오염부하량 산정

육상오염부하 조사지점은 산지천의 하류부분인 용진교 전 지점에서 계절별로 조사를 하였고 육상오염부하량은 조사된 산지천 유량과 각 수질항목별 농도를 이용하여 산정하였으며 그 결과는 Table 3과 Table 4에 나타내었다.

용존산소(DO)는 조사기간동안 $6.2 \sim 8.0 \text{ mg/L}$ 의 범위를 보였으며 평균값은 7.4 mg/L 를 보여 하천수질기준 II등급에 해당되었고, BOD의 경우는 $3.0 \sim 4.0 \text{ mg/L}$ 의 범위를 보였으며 평균값으로는 3.4 mg/L 를 보여 하천수질기준 III등급에 해당되는 것을 알 수 있었다. DIN과 DIP의 경우는 각각 $4.696 \sim 5.410 \text{ mg/L}$ 와 $0.306 \sim 0.332 \text{ mg/L}$ 의 범위를 보였으며 각각의 평균값은 5.110 mg/L 과 0.315 mg/L 의 값을 보였다.

제주항으로 유입되고 있는 산지천의 하천 유입부하량을 산정한 값을 보면 COD의 경우는 0.30 ton/day 의 값을 보였다. 그리고 해역의 부영양화를 유발할 수 있는 영양염류인 DIN과 DIP의 부하량은 각각 300.0 kg/day 와 18.0 kg/day 의 값을 보였다. 여기서 산정된 값은 조 등¹²⁾이 제주도내 우수하천인 연의천, 동홍천, 옹포천 그리고 창고천에서 조사한 하천부하량과 비교해 보면, DIN의 부하량인 평균값

Table 2. Monthly variation of eutrophication index and N/P ratio at each station in Jeju harbor

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

Table 3. The values of water quality and flowrate at Sanzi river

| Variable Name of river | River flow | pH | Temp. | DO | COD | BOD | SS | DIP | DIN | POC | DOC |
|------------------------------|---------------------|------|-------|-----|-------|-----|------|-------|-------|-------|-------|
| | m ³ /day | | (°C) | (| mg/ℓ) | | | | | | |
| Sanzi R. | 3.38E+04 | 7.35 | 13.5 | 6.2 | 5.10 | 3.0 | 5.5 | 0.306 | 4.696 | 0.310 | 2.736 |
| | ~ | ~ | ~ | ~ | ~ | ~ | ~ | ~ | ~ | ~ | ~ |
| | 7.76E+04 | 7.50 | 20.1 | 8.0 | 5.68 | 4.0 | 23.4 | 0.332 | 5.410 | 0.896 | 6.120 |
| mean | 5.59E+04 | 7.40 | 16.7 | 7.4 | 5.40 | 3.4 | 13.2 | 0.315 | 5.110 | 0.630 | 4.570 |

Table 4. River flow and pollutant loadings of Sanzi River discharged into Jeju Harbor

| River flow m ³ /day | Pollutant loadings | | | | |
|-----------------------------------|--------------------|----------|----------------|----------|----------|
| | COD (ton/day) | DIP (| DIN kg/day) | POC (| DOC) |
| 5.59E+04 | 0.30 | 18.0 | 300.0 | 35.0 | 250.0 |

145.1 kg/day(64.7~226.3 kg/day)보다 2배 이상 높은 값을 나타냈고 DIP의 부하량인 14.4 kg/day(6.4~19.2 kg/day)보다 1.2배 이상 높은 부하량을 보였다.

4. 결 론

물질순환모델을 이용하여 제주항의 수질관리 방안을 도출하기 위한 두 번째 단계로서 육상으로부터 유입되는 오염부하와 그로 인한 제주항의 해양 수질 환경특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

- 1) 제주항의 수질특성을 각 항목별로 보면, 용존산소(DO)의 농도분포는 5.1~9.1 mg/L(평균 7.3 mg/L)의 범위를 나타내었고, 총부유물질(TSS)은 만내 전체 평균값은 4.3 mg/L을 나타내었다. 그리고 COD의 농도분포는 1.0~4.9 mg/L(평균 2.2 mg/L)로 대상해역의 대부분이 III등급 해역에 속하였으며 해역의 부영양화에 관계되는 영양염인 DIN과 DIP는 각각 2.14~74.00 µg-at/L(평균 12.20 µg-at/L)와 0.52~4.00 µg-at/L(평균 1.18 µg-at/L)로 2001년 개정 전 해역수질환경기준인 농도와 비교해 보면 평균농도에서 III등급을 초과하는 것을 알 수 있었다.
- 2) N/P비는 산지천 유입수의 영향을 받는 정점 St. 1은 N/P비가 16이상으로 인이 제한 인자이지만, 그 외의 지점에서는 16이하를 나타내어 제주항 내에서 식물플랑크톤 성장의 제한 인자는 질소인 것으로 나타났고, 부영양도 지수를 보면, 제주항 내에서는 계절에 상관없이 기준치인 1을 훨씬 초과하는 것으로 나타났다.
- 3) 산지천의 수질특성을 보면 용존산소(DO)는 평균

값은 7.4 mg/L로 하천수질기준 II등급에 해당되었으며 BOD의 경우는 평균값으로는 3.4 mg/L를 보여 하천수질기준 III등급에 해당되었다. 그리고 DIN과 DIP의 경우는 각각 4.696~5.410 mg/L와 0.306~0.332 mg/L의 범위를 보여 각각의 평균값은 5.110 mg/L과 0.315 mg/L였다.

- 4) 산지천의 하천 유입부하량을 산정한 값을 보면 COD의 경우는 0.30 ton/day의 값을 보였고 DIN과 DIP의 부하량은 각각 300.0 kg/day와 18.0 kg/day의 값을 보였다.

이상에서 조사된 제주항의 수질특성과 산지천 유입부하량은 제주항의 수질관리를 위한 물질순환모델을 적용할 때 기초입력자료로 제공될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 제주대학교 BK 교육개혁지원비에 의해 연구되었다.

참 고 문 헌

- 1) 환경부, 1996, 환경통계연감, 577pp.
- 2) 國立環境研究院, 1991, 全國 主要沿岸 流入汚染 負荷量 算定에 關한 調査研究, 71pp.
- 3) 제주도, 2002, 환경백서, 607pp.
- 4) 제주시, 2000, 산지천 정비 기본 및 실시설계 종합보고서, 587pp.
- 5) 조은일, 박청길, 1998, 제주도 항만의 수질특성 및 예측, 제주대 해양연구논문집, 22, 163-171.
- 6) 조은일, 이병길, 오윤근, 2002, 물질순환모델을 이용한 제주항의 수질관리(I) - 제주항의 물리 해양환경의 변화 -, 한국환경과학회지, 11(1), 25-32.
- 7) 堀江 毅, 1990, 海域の水質・生態系の數値モデル, 土木學會論文集 第417號/II-13, 21-31.
- 8) 해양수산부, 1998, 해양환경공정시험방법, 12-52pp.
- 9) Strickland, J. D. H. and T. R. Parsons, 1972, A Practical Handbook of Sea Water Analysis

조 은 일 · 장 기 봉

- (2nd edn.), Bull. Fish. Res. Board Canada, 167, 310.
- 10) 김광수, 2001, 목포항의 수질 및 부영양도의 계절변화, 한국해양환경공학회지, 4(3), 3-15.
- 11) Okaichi, T., 1985, The cause of red tide in neritic waters, Japan Fisheries res. Convers. Ass., 58-75.
- 12) 조은일, 오윤근, 1998, 제주도내 유수하천에 대한 수질특성 및 오염부하량 산정, 한국환경과학회지, 7(6), 845-851.