

생태계모델을 이용한 가막만 해역의 환경용량 산정

강 훈·김종구*

한국종합환경연구소 물리부, *군산대학교 토목환경공학부
(2006년 2월 14일 접수; 2006년 9월 6일 채택)

The Estimation of Environmental Capacity in the Gamak Bay Using an Eco-hydrodynamic Model

Hoon Kang and Jong-Gu Kim*

Korea environmental technology consulting, Department of oceanophysics, Ansan 426-857, Korea
*School of Civil & Environmental Engineering, Gunsan National University, Kunsan 573-701, Korea
(Manuscript received 14 February, 2006; accepted 6 September, 2006)

The eco-hydrodynamic model was used to estimate the environmental capacity in Gamak Bay. It is composed of the three-dimensional hydrodynamic model for the simulation of water flow and ecosystem model for the simulation of phytoplankton. As the results of three-dimensional hydrodynamic simulation, the computed tidal currents are toward the inner part of bay through Yeosu Harbor and the southern mouth of the bay during the flood tide, and being in the opposite direction during the ebb tide. The computed residual currents were dominated southward flow at Yeosu Harbor and sea flow at mouth of bay. The comparison between the simulated and observed tidal ellipses at three station showed fairly good agreement. The distributions of COD in the Gamak bay were simulated and reproduced by an ecosystem model. The simulated results of COD were fairly good coincided with the observed values within relative error of 1.93%, correlation coefficient(r) of 0.88. In order to estimate the environmental capacity in Gamak bay, the simulations were performed by controlling quantitatively the pollution loads with an ecosystem model. In case the pollution loads including streams become 10 times as high as the present loads, the results showed the concentration of COD to be 1.33~4.74mg/ℓ (mean 2.28mg/ℓ), which is the third class criterion of Korean standards for marine water quality. In case the pollution loads including streams become 30 times as high as the present loads, the results showed the concentration of COD to be 1.38~7.87mg/ℓ (mean 2.97mg/ℓ), which is the third class criterion of Korean standards for marine water quality. In case the pollution loads including streams become 50 times as high as the present loads, the results showed the concentration of COD to be 1.44~9.80mg/ℓ (mean 3.56mg/ℓ), which is the third class criterion of Korean standards for marine water quality.

Key Words : Ecosystem model, Hydrodynamic model, Residual current, Environmental capacity, Phytoplankton, COD, Pollution load

1. 서 론

가막만은 수질이 깨끗하고 수심이 낮아 양식 시설물의 설치가 용이하고, 하천수에 의한 영양염 등의 유입으로 기초생산력이 높은 해역이며, 지형적인

영향으로 양식을 하기에 좋은 조건을 지니고 있어, 어패류 양식장으로 널리 이용되고 있으며, 국내 굴 양식의 30%를 점하는 중요한 어장이다.

그러나 최근 과도한 굴 양식과 주변 임해공단으로부터의 오염물질의 유입 및 인구의 집중으로 인한 도시 확장에 따른 도시하수의 유입으로 인하여 가막만 내 수질이 점차 오염되고 있어, 수질관리 대책이 시급한 실정이다.

Corresponding Author : Jong-Gu Kim, School of Civil & Environmental Engineering, Gunsan National University, Kunsan 573-701, Korea
Phone: +82-63-469-1874
E-mail: kjg466@kunsan.ac.kr

어장의 과학적인 관리를 위해서는 어장이 가지는 환경용량을 파악하는 것이 중요하다. 환경용량은 생물학적 관점에서 주어진 환경이 수용할 수 있는 최대수용력이라 정의¹⁾와, 주어진 생태계가 지속적으로 생산할 수 있는 개체군의 생물량이라 정의^{2,3)} 그리고 어장을 유지하기 위해 보전해야 할 환경조건 즉, 환경적 관점에서 어장의 변화를 일으키기 시작하는 인위적인 영향의 한계로 정의⁴⁾한다.

자정능력의 한계로 표현되는 환경용량은 시뮬레이션을 통하여 산정이 가능하며, 해수 유동, 육상 오염부하량, 저질 용출 등 만 내에서 물질 순환 과정을 표현할 수 있는 생태-유체역학모델이 유용한 도구가 된다.

이런 모델을 이용함으로써 장래 수질을 예측하고, 대상 해역의 환경용량을 파악하여 오염부하에 대한 식감량을 결정하는 등 수질관리 대책의 수립이 가능하다. 즉, 해역의 용도에 적합한 수질을 유지하기 위한 대상 해역의 수용 가능한 최대의 오염 부하량으로 정의되는 환경용량⁵⁾의 범위 내로 유입 부하의 총량을 규제할 수 있다.

기존의 가막만에서의 환경용량을 산정연구는 현 환경 조건하에서 굴의 먹이원으로 고려된 식물플랑크톤의 양, 즉 기초 생산력을 구하고 이를 토대로 해서 알굴의 최대 생산량을 산정하여 생산된 알굴량과 정량적으로 비교 평가하였으며⁶⁾, 기초생산력을 증가시키기 위한 수단으로 여러 환경인자들을 조절하여 기초생산력과 용존산소에 주체를 둔 오염물질의 최대 수용력을 예측하여 산정된 기초생산력에 해당되는 최대 알굴 생산량을 구하였다⁷⁾. 또한 빈산소 수피 해소를 위한 환경용량을 산정한 바도 있다⁸⁾.

그러나 이들 연구는 용존산소와 생산가능한 생물 생산량에 중점을 두어 평가하였고, 주로 생물생산이 일어나는 시기에 연구가 행해졌다. 그러나 해역의 주요한 오염부하원은 하천부하와 저질에서의 용출 부하가 중요한 것으로 평가하고 있으며^{9,10)}, 이들 인자에 평가가 중요하다 하겠다. 따라서 생물생산시기가 아닌 시점에서 하천 오염부하와 저질 용출부하가 해역에 미치는 영향에 대한 수질 환경적 관점에서의 정량적 평가가 필요하다.

본 연구는 생물생산시기가 아닌 4월을 대상으로 해역으로 유입되는 하천오염부하가 해역의 환경에 미치는 영향을 평가하기 위하여 시도하였다. 환경용량에 적용한 환경기준물질은 일반적으로 해역환경 기준에서 유기오염 기준으로 사용되는 COD를 이용하였다. 연구 방법은 가막만의 수질 특성을 조사하고, 3차원 해수유동모델을 이용하여 유동특성을 재현하고, 생태계모델을 이용하여 현재 수질을 재현한

후, 오염부하의 변동에 따른 수질변화를 예측하였다. 최대 환경용량의 크기는 해역수질환경기준 II급수를 기준으로 환경수용력, 즉 환경용량을 산정하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 대상해역의 유역특성

가막만은 한국 남해안의 여수반도와 돌산도에 둘러싸여 있고, 남쪽의 입구에는 여러 섬들 사이에 좁은 수로들이 형성되어 남해와 접해있으며, 북쪽으로는 돌산대교가 위치한 좁은 수로를 통하여 여수만과 연결된다. 남북방향의 길이가 약 15km, 동서방향의 길이가 약 9km인 타원형의 내만으로 면적은 147.5 km²이고, 평균수심은 약 9m인 천해로서 용적은 10.2 × 10⁸ m³이다¹¹⁾.

해저 지형은 북서 내만역이 수심이 깊고, 만 중앙이 대체로 얕은 편이고 남쪽으로 갈수록 차츰 깊어지는 양상을 보이며¹²⁾, 해수유동 패턴은 여수항과 돌산도 사이의 북쪽 협수도와 남쪽 만 입구를 통하여 유·출입되는 왕복성 조류의 영향을 받으며, 가막만은 3개의 수괴가 존재한다고 알려져 있다¹³⁾. 즉 만 내부의 북서쪽은 수심이 깊고 오목한 웅덩이 형태로서 저층에 해수가 고여 있는 정체성 해수이고 부근 육지의 생활하수가 이곳으로 직접 유입되어 부영양화가 진행되고 있으며, 여름철 수온이 높을 경우 저층 해수에 무산소층이 형성된다. 여수항수는 만의 동쪽에 위치하고 연동천과 섬진강 하구수, 돌산, 평사천 등의 영향을 크게 받는 해수이며, 외양수는 남쪽만구에 위치해 있고 외해수의 영향을 많이 받는 해수이다.

2.2. 모델 입력자료 산정

2.2.1. 수질조사

가막만 해역의 수질 특성을 조사하기 위하여 2003년 4월 22일에 Fig. 1에 표시된 12개 정점에서 Nisikin 채수기를 이용하여 층별(표층, 중층, 저층)로 채수하였으며, 이들 자료를 바탕으로 경계자료 및 base. 농도를 구하였다. 또한 동일 정점에서 저질을 채니하여 저질의 영양염 용출부하량을 추정하였다.

2.2.2. 3차원 해수유동 모델의 구축

해수유동 모델의 영역은 가막만 북부의 돌산대교 아래의 협수로, 송도와 돌산도 사이, 만 남부의 백야도와 송도를 잇는 선, 그리고 백야도와 백도 사이를 잇는 선을 개방경계로 하였다. 격자망의 구성은 지형을 충분히 고려할 수 있도록 가로방향으로 78개, 세로 방향으로 90개 격자로 하였고, 각 격자 간격은 200m로 하였다. 연직 방향으로는 수온약층의 깊이를 고려하고 저층 부근의 수질상태를 상세히 살펴 보기 위하여 3개 층으로 구분하였다. 계산되는 총

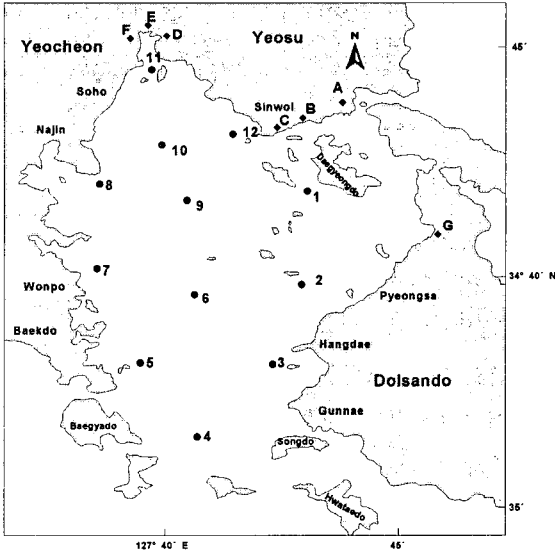


Fig. 1. Location of the sampling station in Gamak bay.

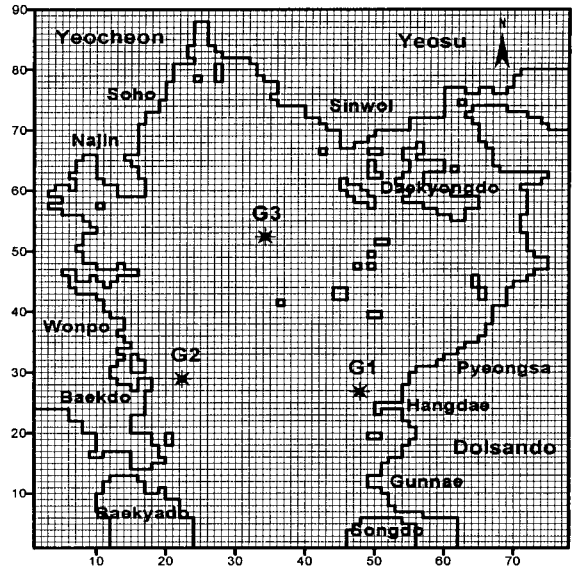


Fig. 2. Finite-difference grid of the three-dimensional model in Gamak bay.

격자수는 21,060개(78×90×3)로 구성하였다(Fig. 2). 해수유동모델의 입력자료는 Table 1에 제시하였다. 모델영역 내의 해수유동을 재현하기 위하여 가막만의 탁월분조인 M₂ 분조를 이용하였다. 경계영역 내의 조위와 위상은 수로국의 자료¹⁴⁾를 이용하였으며, 하천을 통한 모델 영역내로 들어오는 담수 유입량과 수온, 염소량 등 다른 입력자료는 실측치와 문헌

을 통해서 적용하였으며, 바람의 영향은 없는 것으로 가정하였다.

3차원 해수유동 모델을 이용하여 대상해역의 조석류와 유동이 정상상태에 도달한 마지막 한 조석을 조석주기로 평균해서 잔차류를 재현하였다. 그

Table 1. Input data for a hydrodynamic model

| Parameters | Input values |
|---|---|
| Mesh size | $\Delta x = \Delta y = 200m$ |
| Total mesh | $78 \times 90 \times 3 = 21,060$ |
| Water depth | chart datum + MSL |
| Time interval | 5sec |
| Level | 1 : 0~3m 2 : 3~6m 3 : below 6m |
| Tidal level and degree at open boundary | A : 103cm, 266. B : 97.0cm, 265. C : 101cm, 264. D : 101cm, 254. |
| Water temperature and salinity at open boundary | 1 : 15.70°C, 31.85‰ 2 : 15.10°C, 31.85‰ 3 : 15.40°C, 31.93‰ |
| Coriolis coefficient | $f = 2 \cdot \omega \cdot \sin\varphi$ |
| Surface & Internal friction coefficient | 0.0013 |
| Bottom friction coefficient | 0.0025 |
| Horizontal viscosity coefficient | 1.0E3 (cm ² /s) |
| Diffusion coefficient | 1.0E3 (cm ² /s) |
| wind speed | 0.0(m/s) |
| Calculation time | 20 tidal cycle |

결과가 기존에 발표된 관측치와 어느 정도 일치하는지 알아보기 위해서 조류타원도를 이용하여 관측 지점에서 실측된 유향과 유속을 G1, G2, G3 지점에서 비교하였다(Fig. 2).

2.2.3. 생태계 모델의 구축

생태계 모델은 해수유동모델의 잔차류 성분을 유동장으로 하였으며, 3차원 해수유동모델의 격자구성과 동일하게 적용하였다. 각 층별 초기 농도와 경계 농도는 대상해역의 실측치를 토대로 입력하였다. 생태계 모델의 구성요소는 Table 2에 나타내었다.

오염부하원으로 하천으로 통한 유입부하와 저질의 영양염 용출부하를 고려하여 모델에 적용하였다. 모델에 적용된 하천유입 부하량 자료는 여수수산대학 수산과학연구소 자료¹⁵⁾를 이용하였다(Table 3). 저질 영양염 용출량은 Fig. 1의 수질정점에서 채니된 저질을 20±2℃의 조건에서 측정하여 얻어진 값을 이용하였다.

가막만 내의 저질용출 실험에서 얻어진 용출속도는 암모니아질소의 경우 4.02~176.08µg-at/m²/hr의 범위였고, 인산인의 경우 0.003~0.147µg-at/m²/hr의

범위를 보였다(Table 4). 모델 적용을 위하여 각 정점에서 얻어진 용출속도를 선형보간법을 이용하여 각 격자점에서의 용출속도를 계산하여 적용하였다.

2.2.4. 생물학적 파라메타

생태계 모델의 시뮬레이션에 이용된 생물학적 요소는 기존 측정된 자료 및 문헌조사를 통하여 산정하였으며, 생태계 모델의 수식화에 나타나는 파라메타들의 기호 및 정의와 사용된 값들이 Table 5에 제시되어 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 해수유동 예측 결과

3차원 해수유동모델을 이용하여 가막만의 조석류를 해의 안정조건을 고려하여 수치가 안정이 되는 20조석 주기를 택하였으며, 마지막 1조석에 대하여 잔차류를 계산하여 생태계 모델의 입력자료로 이용하였다.

무풍시 재현된 가막만의 조석류의 유속 크기를 보면, 남쪽 만구역에서 유입하는 해수의 유속은 약 30~40 cm/sec의 흐름을 보이며, 북서 내만역의 경

Table 2. Input data for eutrophication model. 3

| Parameter | | Input values | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----------|-------------------|-------------------------------------|-----------|---------|-------------------------|---------|-------|------|
| Mesh size | | Δx=Δy= 200m | | | | | | | |
| Water depth | | chart datum + MSL | | | | | | | |
| Time interval | | 600sec | | | | | | | |
| Initial condition for compartments | | | | | | | | | |
| level | DO | COD | DIP | DIN | POC | DOC | PHYTO | ZOO | |
| | (mg/ℓ) | | (µg-at/ℓ) | | | (mg-C/m ³) | | | |
| 1~3 | 9.62~9.97 | 1.65~1.71 | 1.10~1.41 | 5.69~5.81 | 308~320 | 2033~2067 | 450~470 | 45~47 | |
| Boundary condition for compartments | | | | | | | | | |
| level | DO | COD | DIP | DIN | POC | DOC | PHYTO | ZOO | |
| | (mg/ℓ) | | (µg-at/ℓ) | | | (mg-C/m ³) | | | |
| A | 1 | 9.93 | 0.48 | 1.526 | 5.520 | 267.59 | 2186.0 | 224.0 | 22.4 |
| | 2 | 9.60 | 1.68 | 1.092 | 4.441 | 275.04 | 1553.15 | 236.4 | 23.6 |
| | 3 | 9.46 | 1.76 | 2.483 | 5.101 | 282.50 | 1120.30 | 259.8 | 25.9 |
| B | 1 | 9.93 | 0.48 | 1.526 | 5.520 | 267.59 | 2186.0 | 224.0 | 22.4 |
| | 2 | 9.60 | 1.68 | 1.092 | 4.441 | 275.04 | 1553.15 | 236.4 | 23.6 |
| | 3 | 9.46 | 1.76 | 2.483 | 5.101 | 282.50 | 1120.30 | 259.8 | 25.9 |
| C | 1 | 9.93 | 0.48 | 1.526 | 5.520 | 267.59 | 2186.0 | 224.0 | 22.4 |
| | 2 | 9.60 | 1.68 | 1.092 | 4.441 | 275.04 | 1553.15 | 236.4 | 23.6 |
| | 3 | 9.46 | 1.76 | 2.483 | 5.101 | 282.50 | 1120.30 | 259.8 | 25.9 |
| D | 1 | 9.93 | 0.48 | 1.526 | 5.520 | 267.59 | 2186.0 | 224.0 | 22.4 |
| | 2 | 9.60 | 1.68 | 1.092 | 4.441 | 275.04 | 1553.15 | 236.4 | 23.6 |
| | 3 | 9.46 | 1.76 | 2.483 | 5.101 | 282.50 | 1120.30 | 259.8 | 25.9 |
| Horizontal viscosity coefficient | | | 1.0 E3(cm ² /s) | | | | | | |
| Horizontal diffusion coefficient | | | 1.0 E3(cm ² /s) | | | | | | |
| Vertical diffusion coefficient | | | level 1~3 : 1.0(cm ² /s) | | | | | | |
| Calculation time | | | 40 tidal cycles | | | | | | |

생태계모형을 이용한 가막만 해역의 환경용량 산정

Table 3. Monthly variation of pollutant loads discharged into Gamak bay

| Item | Stream | Jan. | Feb. | Mar. | Apr. | May | June | July | Aug. | Sep. | Oct. | Nov. | Dec. |
|----------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| COD (ton/d) | 1 Kukdong | 0.210 | 0.274 | 0.315 | 0.357 | 0.396 | 0.430 | 0.461 | 0.338 | 0.199 | 0.205 | 0.209 | 0.210 |
| | 2 Bongsan | 0.616 | 0.540 | 0.431 | 0.602 | 0.716 | 0.771 | 0.769 | 0.760 | 0.623 | 0.622 | 0.621 | 0.619 |
| | 3 Yeundeng | 1.455 | 1.572 | 2.022 | 1.854 | 1.642 | 1.384 | 1.082 | 1.774 | 2.280 | 2.082 | 1.878 | 1.669 |
| | 4 Sunso | 0.314 | 0.330 | 0.343 | 0.344 | 0.324 | 0.282 | 0.218 | 1.002 | 2.323 | 1.795 | 1.285 | 0.791 |
| | 5 Sichung | 0.228 | 0.175 | 0.108 | 0.153 | 0.205 | 0.265 | 0.333 | 0.227 | 0.123 | 0.146 | 0.172 | 0.199 |
| | 6 Lucky | 0.290 | 0.313 | 0.336 | 0.307 | 0.268 | 0.219 | 0.160 | 0.211 | 0.228 | 0.244 | 0.259 | 0.275 |
| | 7 Dolsan | 0.010 | 0.011 | 0.009 | 0.008 | 0.006 | 0.005 | 0.004 | 0.009 | 0.015 | 0.017 | 0.016 | 0.014 |
| DO (ton/d) | 1 Kukdong | 0.009 | 0.016 | 0.025 | 0.028 | 0.031 | 0.033 | 0.036 | 0.019 | 0.008 | 0.008 | 0.008 | 0.009 |
| | 2 Bongsan | 0.067 | 0.031 | 0.008 | 0.013 | 0.020 | 0.027 | 0.035 | 0.023 | 0.013 | 0.025 | 0.038 | 0.052 |
| | 3 Yeundeng | 0.175 | 0.165 | 0.156 | 0.172 | 0.190 | 0.208 | 0.227 | 0.160 | 0.103 | 0.120 | 0.138 | 0.156 |
| | 4 Sunso | 0.019 | 0.021 | 0.022 | 0.027 | 0.032 | 0.036 | 0.041 | 0.078 | 0.079 | 0.072 | 0.060 | 0.042 |
| | 5 Sichung | 0.012 | 0.016 | 0.020 | 0.023 | 0.026 | 0.030 | 0.033 | 0.022 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 |
| | 6 Lucky | 0.010 | 0.017 | 0.024 | 0.028 | 0.033 | 0.038 | 0.043 | 0.027 | 0.014 | 0.013 | 0.012 | 0.011 |
| | 7 Dolsan | 0.093 | 0.068 | 0.046 | 0.039 | 0.032 | 0.026 | 0.020 | 0.026 | 0.033 | 0.046 | 0.060 | 0.076 |
| DIP (kg/d) | 1 Kukdong | 4.05 | 6.19 | 8.44 | 8.19 | 7.41 | 6.09 | 4.23 | 5.68 | 4.69 | 4.56 | 4.40 | 4.23 |
| | 2 Bongsan | 8.69 | 6.18 | 4.01 | 5.78 | 7.15 | 8.11 | 8.66 | 11.47 | 10.85 | 10.37 | 9.85 | 9.30 |
| | 3 Yeundeng | 21.59 | 22.34 | 23.05 | 21.69 | 19.89 | 17.66 | 14.99 | 14.71 | 14.14 | 15.93 | 17.75 | 19.61 |
| | 4 Sunso | 4.85 | 5.18 | 5.46 | 5.15 | 4.39 | 3.18 | 1.50 | 7.71 | 18.61 | 17.56 | 14.93 | 10.70 |
| | 5 Sichung | 4.69 | 5.93 | 7.36 | 6.86 | 5.89 | 4.43 | 2.50 | 2.12 | 1.39 | 2.08 | 2.86 | 3.73 |
| | 6 Lucky | 1.79 | 2.25 | 2.75 | 2.41 | 1.98 | 1.44 | 0.81 | 0.62 | 0.45 | 0.78 | 1.11 | 1.45 |
| | 7 Dolsan | 0.56 | 0.50 | 0.36 | 0.27 | 0.19 | 0.13 | 0.07 | 0.12 | 0.18 | 0.26 | 0.35 | 0.45 |
| DIN (kg/d) | 1 Kukdong | 41.57 | 58.54 | 73.40 | 97.68 | 125.35 | 156.39 | 190.81 | 125.38 | 66.06 | 59.42 | 53.12 | 47.17 |
| | 2 Bongsan | 88.03 | 67.98 | 48.35 | 72.48 | 93.74 | 112.13 | 127.65 | 111.31 | 83.89 | 84.99 | 86.04 | 87.06 |
| | 3 Yeundeng | 456.08 | 454.27 | 451.32 | 453.88 | 452.05 | 445.82 | 435.20 | 408.18 | 377.01 | 396.27 | 415.87 | 435.81 |
| | 4 Sunso | 42.68 | 42.84 | 42.87 | 51.49 | 60.16 | 68.88 | 77.65 | 174.37 | 237.47 | 197.80 | 152.11 | 100.39 |
| | 5 Sichung | 2.80 | 3.21 | 3.64 | 4.24 | 4.82 | 5.41 | 5.99 | 3.69 | 1.78 | 2.02 | 2.27 | 2.53 |
| | 6 Lucky | 1.79 | 1.99 | 2.20 | 2.36 | 2.52 | 2.67 | 2.81 | 2.09 | 1.46 | 1.54 | 1.63 | 1.71 |
| | 7 Dolsan | 1.91 | 1.18 | 0.58 | 0.50 | 0.42 | 0.34 | 0.27 | 0.88 | 1.70 | 1.93 | 2.04 | 2.03 |
| POC (kg/d) | 1 Kukdong | 123.63 | 161.37 | 184.34 | 209.20 | 231.57 | 251.44 | 268.81 | 197.42 | 116.25 | 120.14 | 122.67 | 123.83 |
| | 2 Bongsan | 363.01 | 318.86 | 254.77 | 355.26 | 421.04 | 452.09 | 448.43 | 446.20 | 367.33 | 366.88 | 366.01 | 364.72 |
| | 3 Yeundeng | 845.89 | 1025.20 | 1188.51 | 1085.89 | 956.38 | 800.00 | 616.74 | 1035.26 | 1342.52 | 1222.93 | 1100.30 | 974.62 |
| | 4 Sunso | 184.98 | 194.39 | 202.33 | 202.58 | 189.73 | 163.78 | 124.73 | 585.64 | 1368.35 | 1057.37 | 756.49 | 465.69 |
| | 5 Sichung | 134.75 | 102.80 | 62.31 | 88.70 | 119.65 | 155.17 | 195.25 | 133.03 | 72.20 | 86.05 | 101.08 | 117.32 |
| | 6 Lucky | 170.93 | 184.34 | 198.09 | 180.24 | 156.40 | 126.58 | 90.76 | 122.35 | 133.80 | 143.06 | 152.33 | 161.62 |
| | 7 Dolsan | 0.16 | 1.37 | 2.07 | 1.52 | 1.06 | 0.67 | 0.37 | 2.88 | 6.35 | 6.11 | 4.95 | 2.86 |
| DOC (kg/d) | 1 Kukdong | 213.08 | 279.41 | 321.11 | 365.04 | 404.81 | 440.41 | 471.86 | 345.57 | 202.97 | 208.90 | 212.57 | 213.96 |
| | 2 Bongsan | 626.82 | 548.46 | 436.85 | 611.44 | 728.16 | 787.01 | 788.00 | 773.94 | 632.14 | 631.86 | 630.88 | 629.20 |
| | 3 Yeundeng | 1494.96 | 1790.69 | 2059.76 | 1894.66 | 1684.75 | 1403.05 | 1130.55 | 1817.47 | 2318.96 | 2120.58 | 1917.12 | 1708.58 |
| | 4 Sunso | 319.90 | 335.11 | 347.85 | 350.37 | 331.06 | 289.91 | 226.94 | 1025.53 | 2360.47 | 1825.11 | 1306.56 | 804.82 |
| | 5 Sichung | 231.61 | 179.08 | 112.31 | 157.70 | 210.68 | 271.27 | 339.47 | 231.40 | 125.66 | 149.16 | 174.65 | 202.13 |
| | 6 Lucky | 295.21 | 318.20 | 341.75 | 313.05 | 274.38 | 225.73 | 167.10 | 216.97 | 233.29 | 248.72 | 264.19 | 279.68 |
| | 7 Dolsan | 19.89 | 18.05 | 14.83 | 12.65 | 10.60 | 8.68 | 6.89 | 12.62 | 19.92 | 22.24 | 23.00 | 22.22 |

우 5cm/sec이하의 약한 유속이 나타났고, 북쪽 협수로에서 유입하는 해수는 50~70 cm/sec 정도로 가장 강한 유속의 흐름을 보였다.

연안해역의 물질분포에 큰 영향을 미치는 잔차류의 패턴은 대체적으로 북쪽 협수로에서 복잡한 양상을 띠나 유입한 해수는 남향 성분이 강해서 만 중앙부까지 남하하는 경향을 보이며, 남하하는 해수는 대경도 남단에서 복잡한 흐름을 보이며, 평사리 서쪽에서 시계 방향의 환류가 생겨 만 입구로 돌아 나

오며, 일부의 흐름은 북쪽 협수로로 나가는 경향을 보인다. 또한 만 입구에서 북상하는 해수와 남하하는 해수가 만 중앙에서 상접하여 남향하는 경향을 보이며, 만 입구에서는 동향류가 우세하며 시계 방향의 환류가 강하게 나타난다. 유속의 크기는 만 입구에서 5~10cm/sec로 유입하고, 북쪽 협수로인 돌산대교 방향으로 10~15cm/sec 유출하는 경향을 보인다. 만 북부 수역에서는 3cm/sec이하의 미약한 남향의 흐름이 나타난다.

Table 4. Release rate for ammonia nitrogen and phosphate phosphorus in each subarea

| Subarea | NH ₄ ⁺ -N | | Subarea | PO ₄ ³⁻ -P | |
|---------|---------------------------------|-------|---------|----------------------------------|-------|
| | (μg-at/m ² /hr) | | | (μg-at/m ² /hr) | |
| 2 | 4.697 | 0.005 | 7 | 83.570 | 0.007 |
| 3 | 34.701 | 0.004 | 8 | 158.352 | 0.078 |
| 4 | 4.015 | 0.003 | 9 | 146.532 | 0.037 |
| 5 | 8.107 | 0.009 | 10 | 82.434 | 0.043 |
| 6 | 7.879 | 0.011 | 11 | 176.082 | 0.147 |
| 12 | 63.795 | 0.013 | 12 | 63.795 | 0.013 |

Table 5. The biological parameters in an ecosystem model for the Gamak bay

| Symbol | Definition | Unit | Input values | Typical values |
|------------------------------|--|--|--------------|----------------|
| a ₁ | maximum growth rate of phytoplankton at 0°C | day ⁻¹ | 4.0 | 0.060~5.650 |
| a ₂ | respiration rate of phytoplankton at 0°C | day ⁻¹ | 0.022 | 0.030~0.051 |
| a ₃ | maximum grazing rate of zooplankton at 0°C | day ⁻¹ | 0.25 | 0.18 |
| a ₄ | death rate of phytoplankton at 0°C | day ⁻¹ | 0.05 | 0.096~0.330 |
| a ₅ | natural death rate of zooplankton at 0°C | day ⁻¹ | 0.052 | 0.003~0.096 |
| a ₆ | mineralization rate of POC at 0°C | day ⁻¹ | 0.10 | 0.001~0.237 |
| a ₇ | mineralization rate of DOC at 0°C | day ⁻¹ | 0.09 | 0.013~0.043 |
| a ₈ | oxygen consumption rate of sediment at 0°C | day ⁻¹ | 1.000 | |
| K _{SP} | half saturation constant for uptake of PO ₄ ³⁻ -P at 0°C | μg-at/ℓ | 0.5 | 0.032~5.263 |
| K _{SN} | half saturation constant for uptake of DIN at 0°C | μg-at/ℓ | 8.0 | 0.214~66.07 |
| I _{opt} | optimum intensity of radiation for photosynthesis | ly/day | 200 | 11,800~30,200 |
| I _{max} | maximum intensity of sunlight at sea surface | cal/cm ² ·day | 856 | 700 |
| D | length of day | day | 0.587 | |
| k ₀ | dissipation coefficient of light independent of Chl.a | m ⁻¹ | 0.34 | 0.170~2.000 |
| γ | constant of dissipation coefficient depending on Chl.a | m ⁻¹ (mg Chl.a/m ³) ⁻¹ | 0.0179 | |
| k | Ivlev index of zooplankton grazing | (mg C/m ³) ⁻¹ | 0.01 | 0.4E-3~25E-3 |
| P* | function of grazing | mg C/m ³ | 70.0 | 40.0~190.0 |
| μ | digestion efficiency of zooplankton | % | 70.0 | 39.0~98.0 |
| λ | total growth efficiency of zooplankton | % | 30.0 | 4.0~50.0 |
| κ | percentage of the quantity decomposed from POC to DOC to the quantity mineralized from POC | % | 35.0 | 21~35 |
| K ¹ _{DO} | half concentration of DO for mineralization of POC | mg/ℓ | 0.5 | 0.0035~1.000 |
| K ² _{DO} | half concentration of DO for mineralization of DOC | mg/ℓ | 0.5 | 0.0035~1.000 |
| W _P | settling velocity of phytoplankton | m/day | 0.180 | 0.005~0.4 |
| W _{POC} | settling velocity of detritus(POC) | m/day | 0.300 | 0.0~2.0 |
| K _a | reaeration coefficient at sea surface | day ⁻¹ | 0.15 | 0.025~0.650 |
| q _P | Ammonia release from sediment | mg/m ² /day | Tab.4 | Variables |
| q _N | Phosphorus release from sediment | mg/m ² /day | Tab.4 | Variables |

한편, 저층에서는 남쪽 만구에서는 외해로 유출하는 흐름을 보이고, 만 북서부 수역은 표층과는 반대로 북서방향의 흐름이 나타난다(Fig. 3).

이와 같이 잔차류의 흐름 특성을 볼 때 정체성이 강한 북서부 수역의 경우 하천으로부터 유입하는 오염물질은 만 중앙으로 유출하면서 침강하고, 저층에 이르면 다시 북향의 흐름에 의해 다시 만 북쪽으로 향함으로써 오염물질이 이곳에 축적 될 수 있는 흐름의 형태를 보인다.

3차원 해수유동 모델을 이용하여 재현된 가막만의 조석류와 잔차류의 타당성을 검토하기 위해서, Fig. 2에 나타난 지점에서 해양수산부(2000)가 25시간 동안 연속 측류해서 최소 자승법으로 조화분해해서 얻은 조류타원도의 실측치와 모델에서 모의된 계산치를 비교하였다(Fig. 4). 현장 관측 결과 가막만의 탁월한 조석류는 만 내외의 해수가 북동쪽 협수로와 남쪽 만구를 통하여 거의 동시에 유·출입하고, 조석과의 진행에 따라 남과 북의 서로 다른

생태계모델을 이용한 가막만 해역의 환경용량 산정

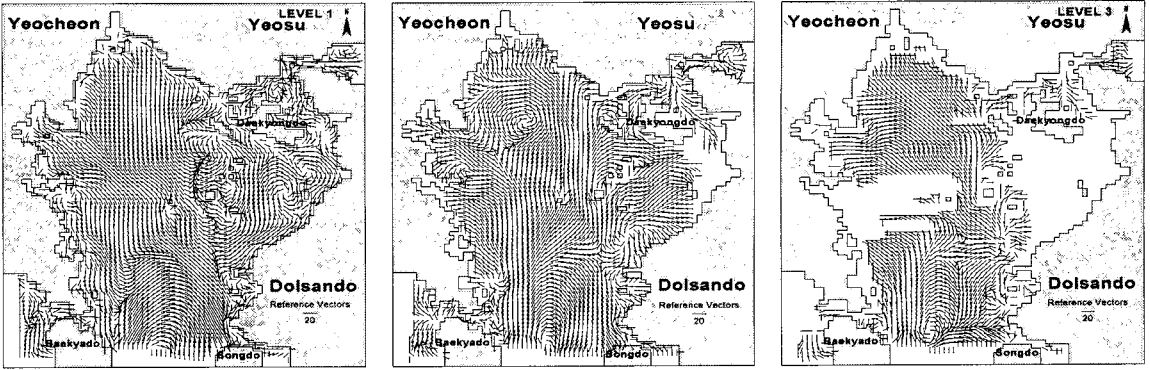


Fig. 3. Computed residual current at 1st, 2nd, 3rd level with no wind.

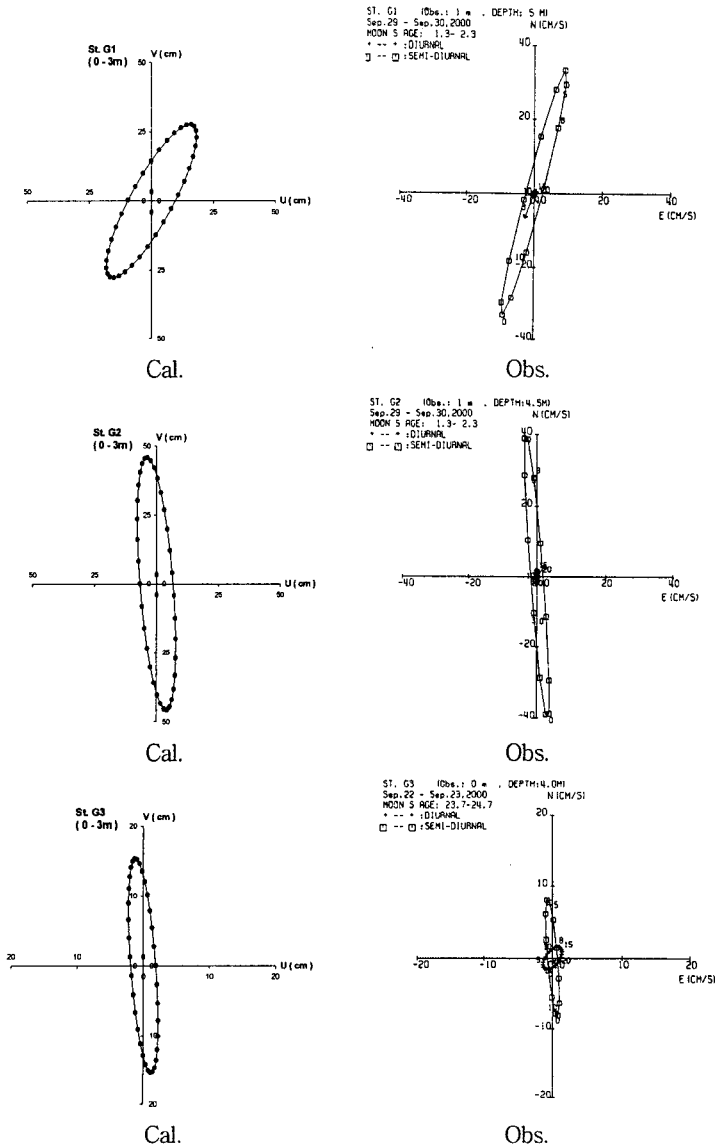


Fig. 4. Comparison of tidal current ellipses between computed and observed results.

방향에서 각각 밀려들어온 해수가 북부 해역과 대경도 부근을 잇는 곳에서 서로 마주치는 것으로 보고되고 있다. 따라서 본 연구의 수치실험 결과는 흐름의 형태가 관측치와 유사하고, 유속의 크기 또한 M_2 분조로 수치 실험한 결과임을 감안 할 때 실측치와 비교적 잘 일치하는 것으로 보여 가막만 내의 해수 유동을 잘 재현하는 것으로 보여진다.

3.2. 생태계 예측 결과

3.2.1. 수질예측 및 모델의 적용성 검토

무풍시의 잔차류 성분을 이용하여 Table 2~4에 제시된 생태계모델의 초기조건과 경계조건, 오염부하량을 입력하여 시뮬레이션을 실시하였다. 계산된 수질예측 결과에 대한 타당성을 검토하기 위하여 수질인자중 식물플랑크톤 현존량과 용존무기인, 용존무기질소, COD의 계산치를 실측치와 비교하여 모델의 적용성을 검토하였으며, Fig. 5에 나타내었다.

적용성의 평가는 실측치와 계산치간의 정확도를 평가하기 위하여 상대오차로 평가하였고, 수질변동의 유사성을 평가하기 위하여 단순회귀분석을 이용한 상관계수로써 나타내었다.

단순회귀분석결과 실측값과 계산값 간의 변화의 유사성을 나타내는 상관계수 r (correlation coefficient)은 DIP, DIN, COD는 각각 0.85, 0.86, 0.88로 상관성이 높게 재현되었으나, Phytoplankton은 0.53으로 상관성이 다소 떨어지는 것으로 나타났다.

Phytoplankton의 경우, 실측값은 $335.10 \sim 593.17 \text{ mgC/m}^3$ (평균 448.41 mgC/m^3), 계산값은 $281.49 \sim 493.04 \text{ mgC/m}^3$ (평균 394.02 mgC/m^3)으로 나타났다. 전체적으로 계산치가 실측치보다 낮게 나타났으나, 평균 상대 오차가 18.48%으로 재현성은 양호한 것으로 나타났다. DIP의 경우, 실측값은 $0.79 \sim 1.86 \mu\text{g-at/l}$ (평균 $1.39 \mu\text{g-at/l}$), 계산값은 $1.43 \sim 2.20 \mu\text{g-at/l}$ (평균 $0.96 \mu\text{g-at/l}$)를 나타내었다. 해역의 평균 상대오차는 12.74%으로 전체적으로 양호하였다. DIN의 경우, 실측값은 $4.77 \sim 7.91 \mu\text{g-at/l}$ (평균 $6.58 \mu\text{g-at/l}$), 계산값은 $4.53 \sim 7.95 \mu\text{g-at/l}$ (평균 $6.52 \mu\text{g-at/l}$)를 나타내었다. 전체적으로 계산치가 실측치보다 낮게 나타났으나, 평균 상대 오차가 6.76%으로 재현성은 양호한 것으로 나타났다. COD의 경우, 실측값은 $1.52 \sim 2.42 \text{ mg/l}$ (평균 1.96 mg/l), 계산값은

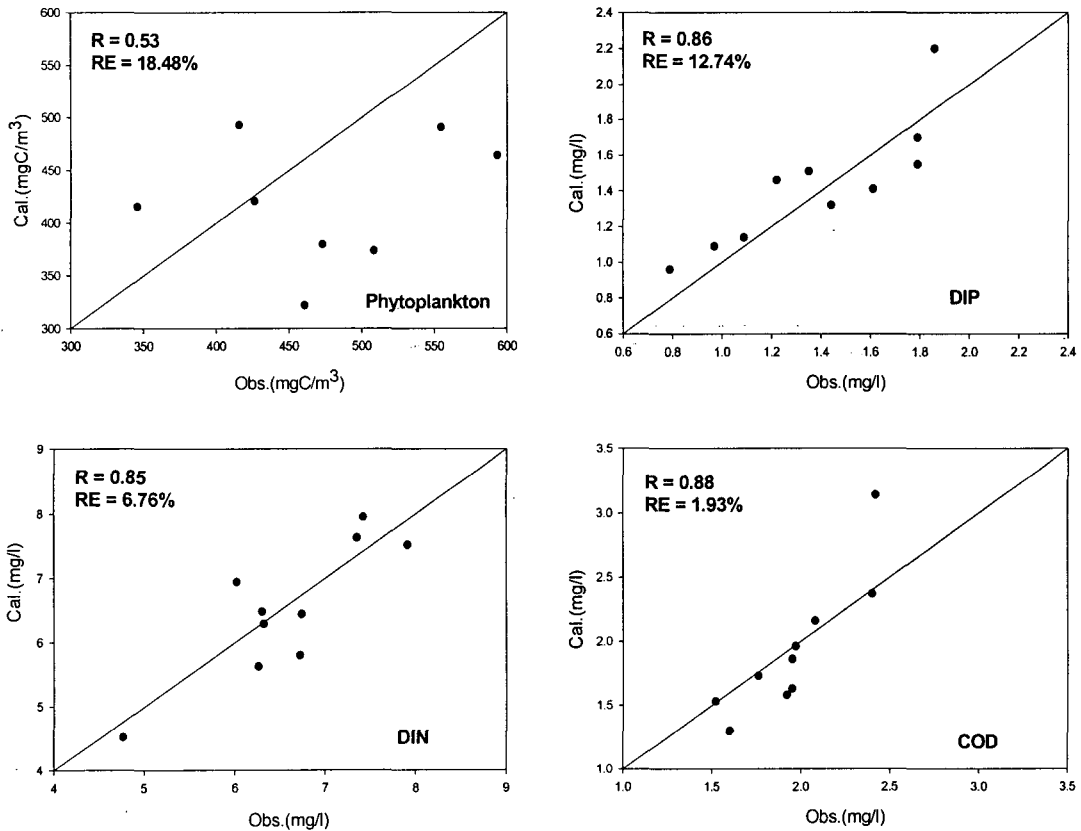


Fig. 5. Comparisons between predicted and observed water quality.

1.30~3.14mg/ℓ(평균 1.93mg/ℓ)를 나타내었다. 상대 오차는 만의 북쪽 지역에서 높게 나타났으나 평균 9.58%로 재현성은 양호한 것으로 나타났다.

3.2.2. 환경용량 산정

하천유입원에 대한 가막만의 환경용량 산정을 위하여 현재 부하량을 기준으로 COD, DIP, DIN, POC, DOC의 양을 모두 일률적으로 10배, 20배, 30배, 50배로 증가시킨 경우에 대하여 COD 변화를 정량적으로 계산하였다. 환경용량은 COD 농도가 해역 수질환경기준 III급수를 기준으로 가막만이 수용할 수 있는 최대의 오염부하량을 산정하였다(Fig. 6).

오염부하를 현재 오염 부하의 10배로 증가시켰을 경우 COD 농도 분포는 1.33~4.74mg/ℓ(평균 2.28mg/ℓ)이었고, 30배로 증가시켰을 경우 COD 농도 분포는 1.38~7.87mg/ℓ(평균 2.97mg/ℓ)이었으며, 50배로 증가시켰을 경우 COD 농도 분포는 1.44~9.80mg/ℓ(평균 3.56mg/ℓ)를 나타내어 평균 COD농도로 III급수를 초과하였다.

이상의 결과에서 수질환경기준 III급수를 기준으로 가막만에서 수용 가능한 하천유입부하량은 현재 부하의 30배 정도로 평가할 수 있었다. 이것을 부하량의 크기로 계산하면 COD 108.75t/d, DIN 20.48t/d, DIP 1.50t/d, DOC 111.15t/d, POC 63.70t/d으로 나타낼 수 있다.

그러나 가막만의 유입부하는 하천유입부하 이외에도 저질 용출부하와 양식생물에 의한 부하가 훨씬 크게 작용하고 있는 해역이다. 해양수산부의 보고서⁸⁾에 제시된 원단위법에 의한 오염부하원별 부하량을 기준으로 가막만에 미치는 오염부하 크기를 비교해 보았다. 원단위 요소는 인구, 축산, 산업, 토지이용 및 양식장부하로 구분되며 양식장부하를 제외한 대부분의 부하는 하천유입부하의 일부로 설명

할 수 있다. 원단위 부하중, 배출부하량에 있어 양식 부하가 차지하는 비율은 BOD의 경우 전체부하의 80%, TN의 경우 전체부하의 60%, TP의 경우 전체 부하의 80%로 아주 높게 나타나, 양식부하에 의한 영향이 큰 해역임을 알 수 있다.

따라서 가막만에서 COD의 수질환경기준을 III급수로 유지에 필요한 환경용량의 크기로 계산된 하천유입부하의 30배는 실제 하천부하를 기준으로 산정한 결과이며, 양식이 이루어지는 계절인 5월부터 익년 2월까지의 양식부하를 고려하면 하천부하의 크기는 더욱 적어질 것으로 판단된다.

4. 결 론

가막만의 환경용량을 산정하기 위하여 해수 유동을 재현한 다음 생태계 모델을 이용하여 수질 인자의 농도 분포를 재현하고, 가막만으로 유입되는 하천부하량을 단계적으로 증가시켜, 해역의 유기 오염도의 지표인 COD의 변화를 정량적으로 평가하였다. 현재 수질 기준을 유지하면서 수용할 수 있는 오염부하량의 한계, 즉 환경용량을 산정한 결과는 다음과 같다.

(1) 가막만 내의 COD 농도는 표층에서 1.52~2.42mg/ℓ, 저층에서 0.16~3.68mg/ℓ로 저층이 표층보다 다소 높게 나타났으며, 해역 수질 기준 II급수에 해당한다. 전 지점별로 보면 하천수가 많이 유입되는 St. 11과 St. 12에서 높은 값을 보였다.

(2) 가막만 내의 해수 유동 특성을 보면, 창조시의 조석류는 북쪽의 협수로와 남쪽 만 구를 통해서 거의 동시에 해수가 유입하는 것을 볼 수 있고, 낙조시의 해수유동은 창조시와 반대의 유동패턴을 보이며 창조류시 개방 경계서 유입한 해수가 대경도와 잉도 사이에서 양쪽 만구로 나뉘어 각각 유출하는 경향을 보인다.

(3) 연안해역의 물질분포에 큰 영향을 미치는 잔차류의 분포는 북쪽 협수로에서 남향하고, 남쪽 만 구에서는 외해로 유출하는 흐름을 보이고, 만 북서부 수역은 표층과는 반대로 북서방향의 흐름이 나타났다. 그리고 해수유동 시뮬레이션의 타당성을 검토하기 위하여 3개의 대표 지점에서 관측치와 계산치를 조류타원도를 이용하여 검토한 결과, 유향과 유속이 유사하게 나타나 가막만의 유동을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

(4) 생태계 모델을 이용하여 시뮬레이션 한 결과 COD의 실측치와 계산치의 유의성을 나타내는 상관계수는 0.88이며, 실측치와 계산치의 일치성을 나타내는 상대오차는 평균 1.93%로, 오차범위 30% 이내로 나타나, 재현성이 양호한 것으로 판단된다.

(5) 가막만에서 COD의 해역 수질 환경기준 III급

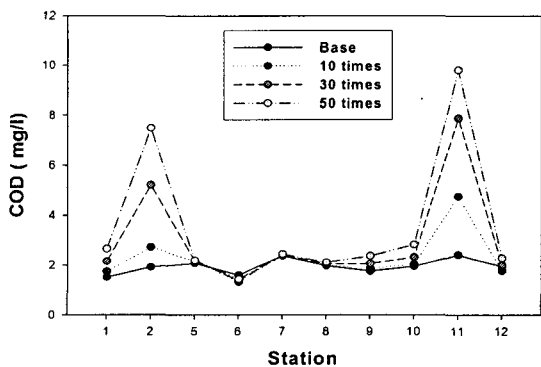


Fig. 6. The predictions of COD depending on various loads increase from Gamak bay under the present condition.

수로 유지하기 위해서 수용 가능한 오염부하량, 즉 환경용량은 현재의 유입부하량의 30배에 해당하였다. 그러나 원단위 부하에서 전체부하의 상당부분이 양식부하가 차지하고 있다는 점에서 하천부하가 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) Odum, E. P., 1953, *Fundamentals of Ecology*, Saunders, Philadelphia, 574pp.
- 2) Kashiwai, M., 1995, History of carrying capacity concept as an index of ecosystem productivity (Review), *Bull. Hokkaido Nalt. Fish. Res. Inst.*, 59: 81-101.
- 3) Dame, R. F. and T. C. Prince, 1998, Bivalve carrying capacity in coastal ecosystem, *Aquatic Ecology*, 31: 409-421.
- 4) 日本水産資源保護協會, 1989, 漁場環境容量算定事業報告書, 1, 1-2.
- 5) 西村 肇, 1976, 環境容量の概念について, *海洋科學*, 42-45.
- 6) 조은일, 1996, 생태계모형을 이용한 어장환경용량 조사, 부산수산대학교 대학원 박사학위 논문, 97pp.
- 7) 이대인, 1997, 어장 기초생산력 향상 방안에 관한 생태계 모델링, 부산수산대학교 대학원 석사학위 논문, 83pp.
- 8) 김광수, 1995, 생태계모형을 이용한 황해의 환경용량 산정, 부산수산대학교 대학원 박사학위논문, 12pp.
- 9) 김중구, 1994, 진해만 해역의 하계 부영양화 모델링, 부산수산대학교 박사학위논문, 107-117.
- 10) 김중구, 김양수, 조은일, 2002, 새만금사업지구 연안해역에서의 부영양화 관리를 위한 생태계 모델의 적용 2. 오염부하량의 정량적관리, *한국수산학회지*, 35(4), 356~365.
- 11) 國立水産振興原 · 全羅南道, 1982, 全南東部沿岸 養殖漁場 基礎環境 및 底棲貝類에 關한 調査, 7-39.
- 12) 姜弼愛 · 朴炅洋 · 李明淑 · 金潤, 1980, 굴 양식장 종합조사, *水振院年報*, 24, 7-46.
- 13) 李奎亨, 1993, 駕莫灣의 養殖 굴의 生産에 關한 水産海洋學的 研究, 釜山水産大學校 理學博士學位論文, 1-180.
- 14) 수로국, 1978, 1977년도 여수항 일대 조류관측결과, 수로기술연보.
- 15) 여수수산대학 수산과학연구소, 1991, 가막만 환경오염 실태 및 보전대안 조사보고서, 1-922.